Cena 20 kop. **Zeszyt I.** Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.





Tabl. I. **Wieża pochyła w Pizie.**

Дозв. Ценз., Варшава 9 Марта 1889. Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29

KSIĘGA PIERWSZA.

C I Ę Ż K O Ś Ć.

ROZDZIAŁ I.

Ogólne zjawiska ciężkości.

§ 1. Działanie ciężkości na powierzchni ziemi. Zjawiska równowagi i ruchu.

Kamień na pewnej wysokości nad ziemią pozostawiony samemu sobie, spada na dół, poruszając się tak długo, dopóki nie dosięgnie trwałej podstawy; ciało okrągłe, np. kula, stacza się po równi, nachylonej do horyzontu; płynne massy, jak woda strumieni i rzek, biegną po nachylonej płaszczyznie, służącej im za łożysko. Wszystkie te zjawiska, oraz wiele innych, które następnie poznamy, stanowią rozliczne przejawy jednej i tej samej siły, a mianowicie *ciężkości*. Wszystkie ciała bez wyjątku, czy to znajdujące się na powierzchni naszej planety, czy w jej głębi, czy też w powietrznych warstwach naszej atmosfery, są ciężkie. Dla ciał stałych i ciekłych, fakt ten oddawna znany był powszechnie. Pokażemy wkrótce, że obejmuje on także pary i gazy. Lecz wpływ ciężkości uwidocznia się nietylko w zjawiskach ruchu. Działa ona także ustawicznie i na ciała znajdujące się w stanie spoczynku, a właściwie w stanie równowagi. Kamień spadający, po dosięgnięciu ziemi, wydaje nam się nieruchomym, w istocie jednak wywiera on ciśnienie na ciała, służące mu za podstawę.

Ciśnienie to, które można uwidocznić za pomocą sprężyny (fig. 1), ciągle wyprężanej przez uczepioną do niej masę i które nazywamy ciężarem ciała, czujemy sami przez wysiłek mięśni ręki naszej, podtrzymującej kamień. Książka spoczywająca na stole, ciśnie jednak nań; z kolei stół wywiera ciśnienie na ziemię. Masa metalowa uwiązana na nitce lub strunie, wypręża ją, a naprężenie to, trwające tak długo, dopóki nie przetniemy nitki, dowodzi najlepiej, że siła ciężkości bezustannie działa na uwiązane ciało. Z wszystkiego tego wynika bardzo jasno, że gdy ciało się nie porusza, nie należy jeszcze sądzić z tego, że nie podlega ono działaniu żadnej siły; owszem, mamy prawo twierdzić, że ani jedno ciało na ziemi, a nawet najmniejsza cząstka ciała stałego, ciekłego lub gazowego, nie wyłamuje się na chwilę z pod wpływu siły ciężkości. Astronomia uczy nas, że ziemia posiada kształt prawie kulisty i że wykonywa jednocześnie dwa rodzaje ruchów, w których biorą udział wszystkie znajdujące się na niej ciała. Jeden ruch polega na jednostajnem obracaniu się ziemi naokoło swej osi; drugi jest postępowym ruchem naokoło słońca, odbywającym się ze zmienną szybkością. Lecz równowaga pojedyńczych części ziemi nie zostaje naruszoną przez żaden z tych ruchów. Stałe masy, stanowiące skorupę ziemską; jądro wewnętrzne, będące prawdopodobnie w stanie stopionym; część płynna na powierzchni ziemi czyli morza i nakoniec powłoka gazowa, otaczająca kulę ziemską ze wszystkich stron, znajdują się w stanie równowagi, wynikającej z wzajemnego na siebie ciśnienia pojedyńczych części, wskutek siły ciężkości.

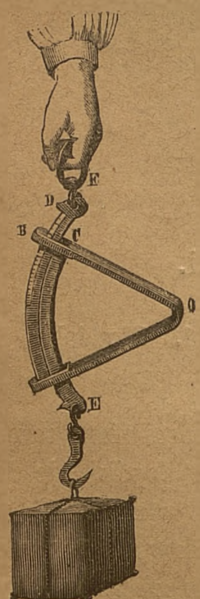


Fig. 1. Działanie siły ciężkości, uwidocznione przez wyprężenie sprężyny.

Prawdopodobnie cała ziemia była niegdyś płynną, [1]) a roz-

[1]) Przeciwko tej hypotezie, za twórcę której uchodzi zwykle Laplace, występowała w nowszych czasach szkoła neoneptunistów z Bischoffem na czele, tymczasowo jednak zachowamy jeszcze tę hypotezę.

maite warstwy, tworzące jej wnętrze, układały się według swych gęstości, to jest najcięższe znalazły się najbliżej środka, najlżejsze zaś na powierzchni; w taki tylko sposób byłyby spełnione warunki, niezbędne dla równowagi ciał płynnych, pozostających pod wpływem siły ciężkości. Pomijając zresztą wewnętrzne części ziemi, niedostępne naszemu badaniu, u pozostałych widzimy dokładnie to samo ugrupowanie: na spodzie masa stała — *ląd*, następnie na trzech czwartych powierzchni część płynna — *morze;* nakoniec nad obydwiema ciała gazowe — *powietrze.*

Wszystkie te części cisną jedne na drugie. Badając grunt lądów lub wysp, widzimy, że wszystkie jego części wzajemnie służą sobie jako podpory. W górach i równinach, dzięki wpływowi siły ciężkości, działającej na każdą pojedyńczą cząstkę, masy są tak ułożone, że równowaga nigdy albo bardzo rzadko zostaje naruszoną. Gdyby działanie siły ciężkości ustało, inne siły przyrody, nie znajdując oporu, zburzyłyby lądy, skały i góry, tam gdzie obecnie widzimy porządek, będący rezultatem równowagi mas, zapanowałby chaos.

Człowiek, jako naśladowca natury, spożytkował siłę ciężkości i powstające przez nią ciśnienie, przy wznoszeniu najtrwalszych budowli. Stałe materyały umieszczał on możliwie pionowo, a przez to udało mu się wznieść pomniki, które w ciągu wieków stawiały opór niszczącym wpływom elementów, jak np. egipskie piramidy. Siła ciężkości utrzymuje także wodne masy w ich naturalnych łożyskach, jeziora i morza w granicach, w obrębie których ciecze te pozostawałyby w spoczynku, gdyby zewnętrzne siły nie poruszały ciągle górnemi ich warstwami. Zdarza się, że pod wpływem nieprawidłowo działających sił ziemskiego pochodzenia, jak np. trzęsienia ziemi i huragany, a także wskutek prawidłowego wahania przypływu i odpływu, morze wznosi się bardzo wysoko i występuje po za zwykłe granice. Wkrótce jednak powraca ono do normalnego stanu równowagi i spoczynku, poczęści wskutek ciężaru swych składników, poczęści zaś wskutek wzajemnego tarcia cząstek wody. Laplace, szukając warunków absolutnie stałej równowagi morza, znalazł jeden tylko, a mianowicie że gęstość wód oceanu powinna być nieco

mniejszą od gęstości ziemi; właśnie temu warunkowi staje się zadosyć w przyrodzie. Gdyby wody morskie były jeszcze lżejsze niż są, znajdowałyby się ciągle w stanie największego wzburzenia, gdyby zaś były cięższe, naruszenie równowagi wskutek przypadkowych przyczyn ze strony lądów i skał, sprowadzałoby najokropniejsze katastrofy. Lecz siła ciężkości działa nietylko na masy, z których składają się lądy i morza; warstwy powietrzne również ulegają jej wpływowi. Gdyby nie ciśnienie, utrzymujące warstwy te blizko ziemi, to z jednej strony elastyczność albo dążność do rozszerzania się, będąca, jak następnie zobaczymy, główną własnością gazów, z drugiej zaś siła zwana odśrodkową. wynikająca z obrotowego ruchu ziemi i dążąca do odrzucania ciał od środka tej ostatniej, rozproszyłyby całą atmosferę po przestrzeniach wszechświata. Takie są w ogólnych zarysach zjawiska, występujące wskutek ciągłego, i że tak powiemy, utajonego działania siły ciężkości na ziemi. Siła ta właśnie utrzymuje wszędzie równowagę i przywraca ją napowrót w wypadkach naruszenia przez inne czynniki przyrody.

Ale i zjawiska ruchu, wywoływane przez tę siłę, przedstawiają obraz niemniej ciekawy i wspaniały.

Nieprzezwyciężone dążenie wszystkich ciał ku środkowi ziemi sprawia, że wody przenikają do jej wnętrza. Przesiąkanie to rozluźniając ziemię i skały, powoduje kruszenie się gór; stoki tych ostatnich stają się coraz bardziej obnażone, a odłamki napełniają doliny. Przyczyną tych zjawisk nie jest jedynie siła ciężkości; zobaczymy następnie, że dopiero w połączeniu z innemi siłami fizycznemi lub chemicznemi, a szczególniej z cieplem, wywołuje ona większą część zjawisk ruchu, odbywających się na powierzchni naszej ziemi i w otaczającej ją atmosferze; jednakowoż siła ciężkości odgrywa w zjawiskach tych rolę najgłówniejszą.

Często dzieło zniszczenia uwidocznia się dopiero w chwili nastąpienia katastrofy. Olbrzymie masy skaliste, podminowane u podstaw, tracą nagle równowagę i staczają się ku dołowi, druzgocząc wszystko na swej drodze. W ten sposób całe góry pokryły swemi gruzami wsie i miasta, a historya zapisała liczne przykłady podobnych okropnych wydarzeń. W XIII wieku góra Gre-

nier, wierzchołek której obecnie jeszcze przewyższa góry na południowej stronie doliny Chambéry, oberwała się częściowo i pogrzebała miasteczko Saint-André, oraz liczne wsie; do dziś dnia pokazują przepaście Myans, kryjące pozostałości ludzkich siedzib i trupy ich mieszkańców. Niemniej straszny wypadek miał miejsce w r. 1806, kiedy z boków góry Ruffi stoczyła się olbrzymia masa skał, która kompletnie zasypała wiele wsi i częściowo zapełniła małe poblizkie jezioro. Zbytecznem byłoby obliczać wielkość niszczącej potęgi takich mas, spadających często z bardzo znacznych wysokości, z coraz wzrastającą prędkością. Lawiny są to zjawiska podobne, lecz zdarzające się daleko częściej, niż kruszenie lub obrywanie się gór. Tutaj wielkie masy śniegu, nagromadzone na pochyłości górskiej lub na brzegu przepaści, wskutek własnego ciężaru obrywają się i spadają na dół, miażdżąc wszystko co staje im na drodze. Często drobny impuls, jak wystrzał pistoletu, a nawet krzyk, wystarczają do naruszenia równowagi i wywołania zjawiska. W lodowych górach okolic podbiegunowych, wzajemne ciśnienie brył jest przyczyną zjawisk podobnych, wskazujących nieprzepartą potęgę siły ciężkości. Lodowce, to jest masy stałego śniegu, zbitego na twardy lód, ulegając na stokach góry ciśnieniu mas wyżej leżących, staczają się powoli, a postępowy ich ruch tak jest energiczny, że skały, po których on się odbywa, zostają mocno porysowane przez krystaliczną masę lodu i zawarte w niej odłamki kamieni [1]).

Podczas wybuchów wulkanicznych, zamknięte gazy, wskutek swej prężności, wyrzucają często w powietrze popiół, kawały kamieni, a nawet całe skały, a jakkolwiek masy te, wyrzucone do góry siłą uderzenia z wnętrza ziemi, zdają się być na chwilę uwolnione z pod wpływu siły ciężkości, to jednak przeciwdziałanie tych dwóch czynników nie trwa długo i wkrótce masy wulkaniczne ulegają niezmiennemu prawu, któremu poddane są wszystkie ziemskie ciała. To samo prawo rządzi spadaniem gradu, deszczu, śniegu, to jest tych części pary wodnej, które wskutek

---

[1]) Reclus-Ule, Ziemia

zgęszczenia stały się cięższe od warstw powietrznych, do wysokości których się wzniosły pod wpływem działania ciepła.

Dotychczas mówiliśmy tylko o właściwym spadku ciał, których równowaga, wskutek jakiejkolwiek przyczyny, została naruszoną. Ale na powierzchni naszej planety odbywają się inne jeszcze ruchy, także zależne głównie od siły ciężkości i tworzące zadziwiający cykl, bez którego życie na ziemi wkrótceby wygasło. Bezustanne parowanie wody powoduje tworzenie się chmur, które, wskutek różnicy w ciężarze cząstek pary, stanowiącej chmurę i w ciężarze powietrza, wznoszą się do górnych warstw atmosfery. Para wodna, skraplając się, staje się cięższą, spada na ziemię i tworzy potoki, strumienie i rzeki; następnie biegnie po naturalnej pochyłości gruntu i łączy się z wodami oceanu, bądź to dążąc wolno w prądzie majestatycznym, bądź to pędząc szybko i z szumem po bardziej stromem łożysku. Czasami wody, wstrzymane przez naturalne przeszkody, rozszerzają się w jeziora; innym razem, znalazłszy się nad brzegiem ściany skalistej, spływają z niej pod postacią wodospadu; przypomnimy tutaj tylko wodospad Renu, blizko Szafhuzy, wodospad Niagary w północnej Ameryce i katarakty Zambezu w południowej Afryce. Prądy wodne spotykamy nietylko na lądzie, przez ocean również przebiegają prądy, których prawidłowość ruchu podtrzymywaną jest przez siłę ciężkości, jakkolwiek powstanie swoje zawdzięczają one, jak zobaczymy, działaniu innego czynnika przyrody, a mianowicie ciepła. Siła ciężkości nakoniec w połączeniu z innemi czynnikami przyrody, rządzi wszystkiemi ruchami w atmosferze. Niema jednem słowem zjawiska na ziemi, w którem siła ciężkości nie brałaby ciągłego udziału, bądź to przywracając równowagę, bądź to powodując ruch. Nawet tam, gdzie na pozór została przezwyciężoną, działa ona bezustannie i z jednakową mocą, tak, że niema sposobu zniweczenia jej wpływu.

§ 2. Ciążenie powszechne.

Widzieliśmy wyżej, że wszystkie zjawiska, których obraz przesunął się przed nami, są skutkiem jednej i tej samej przyczy-

ny, zwanej siłą ciężkości. W ogóle *siłą* nazywamy każdą przyczynę, która wywołuje ruch ciała, albo zmienia kierunek lub prędkość ruchu.

Pytanie, jaka jest właściwa natura siły ciężkości, leży po za obrębem naszej pracy; ograniczymy się też na zbadaniu jej działań i praw, według których one zachodzą. Rozważmy tedy następujące punkty. W jakim kierunku ciało spada, gdy nie znajduje żadnej przeszkody; dalej, na jaki punkt ciała dana siła wywiera swe działanie; nakoniec z jaką mocą stara się wprawić w ruch każdą materyalną cząstkę. Wszystkie te pytania zostały przez naukę rozwiązane.

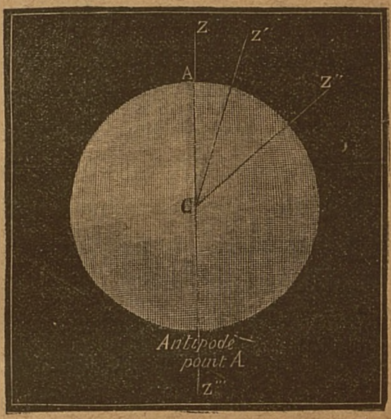


Fig. 2. Środek ziemi, jako punkt przecięcia pionowych.

Zajmiemy się najprzód kierunkiem działania siły ciężkości.

Wszystkie ciała spadają z góry na dół w kierunku prostopadłym do miejsca spadku i w tym też kierunku cisną na podstawę. Kierunek ten zowie się *pionowym*. Zdaje się, jakoby siła ciężkości działała z wnętrza ziemi, a ponieważ przy niezbyt małych odległościach, wszystkie owe prostopadłe linie pozornie biegną równolegle do siebie, możnaby pomyśleć, że działa tutaj niejedna siła, lecz mnóstwo pojedyńczych sił, mających swe siedlisko w rozmaitych punktach wnętrza ziemi. Łatwo jednak wykazać, że wniosek taki nie byłby ścisłym. W istocie siła ciężkości działa wszędzie w jednym i tym samym kierunku. W każdej miejscowości, pod wszelkiemi szerokościami geograficznemi, na równiku, na biegunach, na równoleżnikach pomiędzy biegunem a równikiem, siła ta objawia się zawsze w kierunku prostopadłym do poziomu.

Każdą niezbyt wielką część południka ziemskiego, to jest koła, przechodzącego przez oba bieguny i przez jakikolwiek punkt na ziemi, można uważać za prostą linię, która stanowi poziom

dla danej miejscowości. Prostopadłe do tych poziomów czyli linje pionowe jak z, z', z'' (fig. 2, *str.* 9) dla różnych punktów, na południku tym leżących, przedłużone do wnętrza ziemi, schodzą się w centrze koła południkowego, który jest zarazem środkiem C ziemi. Równoległość tedy pomiędzy różnemi liniami pionowemi, nasuwająca myśl o wielorakości sił ciążenia, jest tylko pozorną, w istocie bowiem linie te przecinają się w jednym punkcie, to jest w środku ziemi, który możemy uważać za siedlisko *siły ciężkości.*

Ściśle mówiąc, ziemia nie przedstawia doskonałej kuli, przy biegunach bowiem jesł spłaszczoną, na równiku bardziej wypukloną i dlatego pionowe punktów położonych w rozmaitych szerokościach geograficznych, nie przecinają się dokładnie w tym samym punkcie, rezultat więc powyższy jest tylko przybliżony. Oprócz tej przyczyny zboczenia, działają jeszcze inne, jak zobaczymy, lokalne nieprawidłowości, które bardzo komplikują określenie owego siedliska siły ciężkości. Dla nas wszakże rozmaite te zboczenia nie są ważne i dlatego powyższe wyłuszczenie możemy wyrazić w formie następującego prawa:

Wszystkie ciała dążą do środka ziemi. Ciężkość działa na nie jako jedna siła, wychodząca z tego punktu.

Od prawa tego nie znamy żadnych wyjątków.

Czy ciało znajduje się na powierzchni ziemi, czy na jakiejkolwiek wysokości w powietrzu, czy też wewnątrz ziemskiej skorupy w najgłębszych warstwach jej pokładów, w każdym wypadku obserwacya stwierdza słuszność tego prawa.

Wobec tego nie należy pojęć „na dół“ i „do góry“, mających tylko znaczenie lokalne, stosować do całej w ogóle kuli ziemskiej. W poprzednich wiekach nie miano jeszcze o tem dokładnego wyobrażenia, kiedy bowiem Kolumb puszczał się w podróż w celu znalezienia zachodniej drogi do Indyj, zrobiono mu między innemi i ten zarzut, że jeżeli nawet uda mu się zjechać na dół po kuli ziemskiej, to nie może jednak się spodziewać, że będzie mógł powrócić do góry po stromej drodze. Widzimy, że w tym razie pojęcia góry i dołu, stosowne dla naszego miejsca zamieszkania, zostały niewłaściwie uogólnione do całej kuli ziemskiej.

Obecnie nawet pojęcie o tem, że kierunki spadania ciał schodzą się w jednym punkcie, nie jest jeszcze tak rozpowszechnionem, jakby tego należało oczekiwać. Ludzie, zdolni wyobrazić sobie, że ziemia jest kulą, zamieszkałą we wszystkich punktach swej powierzchni, nie mogą jednak pojąć, w jaki sposób przeciwnożni względem nas mieszkańcy potrafią utrzymać się na ziemi, gdy nogi ich skierowane do góry, a głowa na dół, oraz w jaki sposób utrzymuje się u nich równowaga wszystkich ciał stałych i ciekłych. Po głębszem zastanowieniu przekonaliby się wkrótce, że pojęcia „na dół“ i „do góry“ są tylko względnemi, że na bardzo wielkiej kuli, wszystkie części powierzchni można z jednakową słusznością uważać jako poziome i że dążenie wszystkich ciał do środka ziemi objaśnia dostatecznie utrzymywanie się tych ciał na powierzchni, niezależnie od miejsca, w którem się one znajdują.

Czy tylko ziemia wywiera powyżej opisane działanie? Czy nie mamy raczej przed sobą specyalnego tylko wypadku daleko ogólniejszej siły, przejawiającej się w całym wszechświecie?

Przed dwoma jeszcze wiekami na pytania te nie umiano dać żadnej odpowiedzi. W owym dopiero czasie doświadczenia Galileusza nad spadkiem ciał i głębokie badania Huyghens'a nad podstawami mechaniki, pozwoliły Newtonowi dowieść, że siła wywołująca zjawiska ciężkości na powierzchni ziemi, jest tą samą, która w całym wszechświecie utrzymuje ciała niebieskie na właściwych im drogach. Siła ciężkości jest tylko oddzielnym wypadkiem ciążenia powszechnego.

Pod tem ostatniem pojmujemy ten ogólny fakt, że dwa jakiekolwiek ciała przyciągają się i mają dążność zbliżania się ku sobie, albo, gdy nic temu nie stoi na przeszkodzie, istotnie się zbliżają z siłą, w pewien określony sposób zależną od ich mas i od ich wzajemnej odległości.

Masą danego ciała nazywamy ilość jego materyi. Pojęcie masy należy ściśle odróżnić od pojęcia ciężaru. Ten ostatni zmienia się względnie do położenia ciała na ziemi, jest inny, jak zobaczymy później, na równiku, inny na biegunie, dalej byłby różny na ziemi, słońcu, księżycu i t. d. Natomiast masa danego

ciała, czyli ilość jego materyi pozostaje tą samą, niezależnie od położenia jego we wszechświecie. Jednakże w tem samem miejscu ziemi równe masy mają jednakowe ciężary i dla tego w tych warunkach ciężar może stanowić miarę masy tak, że przyjmujemy, że ciało 2, 3 i t. d. razy cięższe od innego posiada tyleż razy większą masę. Prawo, wyrażające zależnosć przyciągania się dwóch ciał od ich mas i odległości można przedstawić w następujący sposób: Jeżeli siłę, z jaką przyciągają się dwie jednakowe masy, znajdującc się w odległości równej jednostce, oznaczymy przez jedność, to podwojenie jednej z dwóch mas powiększy ową siłę także dwa razy; jednoczesne potrojenie drugiej masy, potraja wielkość tej samej siły, tak że będzie ona 2 × 3, to jest sześć razy większa, niż w początku. Lecz siła ta zależy nadto od odległości, dzielącej przyciągające się ciała. Jeżeli, przy niezmiennych masach, zmniejszymy dwa razy tę odległość, przyciąganie będzie 2 × 2, to jest cztery razy większe; przy odległości trzy razy mniejszej, przyciąganie będzie 3 × 3, to jest dziewięć razy większe i t. d. *Przyciąganie więc pomiędzy ciałami jest wprost proporcyonalne do iloczynu z ich mas i odwrotnie proporcyonalne do kwadratu* [1]) *z odległości.*

Jest to prawo zasadnicze, a zjawiska, zależne od siły ciężkości, przedstawiają tylko specyalne zastosowanie tego prawa. Nie było rzeczą łatwą wyprowadzić zeń odpowiednie wnioski; obliczyć wzajemny wpływ wszystkich pojedyńczych, bardzo drobnych mas, składających ogólną masę kuli ziemskiej i znaleść ostateczny rezultat wszystkich tych działań. Newton, a po nim wielcy matematycy, którzy rozwijali dalej jego idee, jak d'Alembert, Euler, Maclaurin, Lagrange, Laplace i inni, pokusili się o rozwiązanie tego trudnego zadania. Dowiedli oni, że kula, w której materya zupełnie jednostajnie jest rozmieszczoną, działa na każdy zewnętrzny punkt dokładnie tak samo, jak gdyby cała materya ta skupioną była w środku kuli. Podobnie zachowuje się kulista warstwa, mająca wszędzie jednakową grubość, a więc i sze-

---

[1]) Kwadratem liczby nazywamy iloczyn, otrzymany z pomnożenia jej przez samą siebie.

reg takich, koncentrycznie ułożonych warstw, których gęstość zmienia się według pewnego określonego prawa.

Ten ostatni właśnie wypadek ma miejsce z naszą ziemią i skupienie niejako siły ciężkości w środku ziemi objaśnia, dlaczego wszędzie ciała spadają w kierunku prostopadłym do poziomu danego miejsca, to jest w kierunku, który łączy ciało spadające ze środkiem ziemi.

Musimy atoli ciągle zachowywać w pamięci, że cała masa kuli ziemskiej wywiera przyciąganie, przyczem najdrobniejsza nawet jej cząstka bierze udział w wytwarzaniu ogólnego rezultatu. Pod wpływem tego przyciągania, kamień zostawiony swobodnie, zbliża się do ziemi, ponieważ jednak przyciąganie mas jest wzajemne, to znaczy, że każda z nich przyciąga i jest przyciąganą, i ziemia więc zbliża się wtedy do kamienia. Oba ciała dążą ku sobie, lecz tylko ruch kamienia jest widoczny, siła bowiem powodująca ten ruch jest bardzo znaczną, w stosunku do masy kamienia; ruch zaś ziemi jest nieskończenie powolny, gdyż przyciąganie wywierane przez kamień na ziemię jest w stosunku do jej masy niezmiernie małem.

Powiedzieliśmy już, że przyciąganie ciał jest faktem powszechnym, w istocie, przejawy jego widzimy nietylko na ziemi, ale w ogóle we wszechświecie.

Ziemia i księżyc przyciągają się wzajemnie, a z kolei oba te ciała w takim samym znajdują się stosunku względem słońca. Wszystkie planety naszego systemu słonecznego ciągle wpływają na siebie wzajemnie, również jak i na olbrzymią kulę, świecącą we wspólnem ich ognisku. Ogromna masa tej kuli słonecznej utrzymuje je wszystkie na ich drogach. Ruchy ciał niebieskich naszego systemu zmieniają się i wzajem regulują pod wpływem tej samej siły wzajemnego przyciągania ciał. Przytoczymy tutaj dwa tylko wybitne przykłady ciążenia w przestrzeniach niebieskich. Peryodyczne zjawiska przypływu i odpływu morza są rezultatem przyciągającego wpływu księżyca i słońca. Meteory, te miniaturowe ciała niebieskie, spadające niekiedy na powierzchnię naszej planety, dowodzą, że przyciąganie ziemi jest w stanie wyprowadzić zewnętrzne masy z właściwych im dróg. W końcu

najnowsze astronomiczne badania dowodzą, że ta sama siła przejawia się w ruchach najodleglejszych gwiazd. Gwiazdy podwójne, są to systemy słońc, znajdujące się w olbrzymich od nas odległościach i również obracające się naokoło siebie, widoczno zatem, że i wzajemny ich ruch musi ulegać tym samym prawom, według których odbywają się ruchy planet.

ROZDZIAŁ II.

Prawa działania siły ciężkości.

§ 1. Swobodny spadek ciał. — Jednakowa prędkość ciał spadających w próżni.

Dawno już zauważono, że ciała ciężkie, jak naprzykład metale, spadają na ziemię znacznie prędzej od ciał lekkich, spuszczonych z tej samej wysokości i od czasów Arystotelesa przyjmowano, że prędkość spadku zależy od ciężaru i od materyału spadającego ciała. Do Galileusza nikt jednak nie pomyślał o stwierdzeniu słuszności tego poglądu i dopiero doświadczenia, wykonane przez uczonego włoskiego ze szczytu sławnej wieży pochyłej w Pizie (tabl. I), wykazały jego błędność. Kule z różnych metali — ze złota, miedzi, ołowiu, mające jednakową objętość, lecz różny ciężar, spadały ze szczytu tej wieży na powierzchnię ziemi prawie w tym samym czasie; jedna tylko kula woskowa znacznie się opóźniała. Różnica atoli w czasach spadku nie była dosyć dużą, aby ją można było przypisać nierównym ciężarom spadających ciał; w takim bowiem razie ciało dwa razy cięższe spadałoby także dwa razy prędzej, czemu jednak doświadczenie kłam zadawało. Powtarzając podobne doświadczenia w powietrzu i w wodzie, Galileusz przekonał się, że różnice w czasach spadku zależą od gęstości środka (powietrza, wody), a nie od ciężarów spadających ciał, z czego wywnioskował, że opór śródka stanowi prawdziwą przyczynę obserwowanych różnic.

Wniosek ten możemy stwierdzić doświadczeniem, wykonanem po raz pierwszy przez Newtona. Weźmy w tym celu długą

szklaną rurę, zakończoną mosiężnemi oprawami, z których jedna jest hermetycznie zamkniętą, druga zaś wydłuża się w rurkę, dającą się zamknąć kranem i połączyć z pompą powietrzną. Wprowadźmy do wnętrza rury drobne przedmioty o rozmaitym ciężarze — kawałki metalu, drzewa, korka i wypompowawszy z niej powietrze, zamknijmy kran. Jeżeli teraz nagłym ruchem przewrócimy rurę i nadamy jej położenie pionowe, to wszystkie te przedmioty jednocześnie spadną na dno (fig. 3). Gdybyśmy to samo zrobili wtedy, gdy rura zawiera powietrze, to zauważylibyśmy rożnicę w spadku: ciała najcięższe spadłyby najprędzej, najlżejsze zaś — najwolniej. Jeżeli będziemy powtarzali to doświadczenie tak, aby za każdym razem coraz bardziej wypompowywać powietrze, to zobaczymy, że różnica ta staje się tem mniejszą, im mniej jest powietrza w rurze i że przy możliwie zupełnej próżni, wszystkie ciała, niezależnie od swego ciężaru, jednocześnie dosięgają dna rury.



Fig. 3. Doświadczenie, pokazujące, że wszystkie ciała spadają w próżni z jednakową szybkością.

Z powyższego wynika, że opór środka stanowi istotną przyczynę nierównej prędkości spadku różnych ciał. Rozważmy wypadek dla nas najważniejszy — gdy ciała spadają w powietrzu. Spuśćmy z tej samej wysokości dwa ciała jednakowo wielkie, lecz różnego ciężaru, dajmy na to pieniądz metalowy i krążek papierowy. Każden z nich spadając, musi ciągle rozsuwać cząstki powietrza, przez co — jak zobaczymy później — traci część swej prędkości; stratę tę, w danym razie dla obu ciał jednakową z powodu równej ich objętości, ponosi jednak w wypadku z pieniądzem większa masa, niż w wypadku z papierem, przez co zmniejszenie prędkości krążka jest większem niż pieniądza i pierwszy wolniej spada na ziemię. Różnica byłaby jeszcze znaczniejszą, gdyby ciała te spadały

w środku gęściejszym od powietrza, np. w wodzie. Jeżeli zaś położymy krążek na pieniądzu, tak, ażeby one razem jako jedna całość spadały, to oba jednocześnie dosięgną ziemi dlatego, że w tym razie pieniądz toruje drogę krążkowi, rozsuwając przed nim cząstki powietrza. Z drugiej strony weźmy dwa ciała równego ciężaru, lecz różnej objętości — kartkę papieru i kulkę zrobioną z takiej samej kartki; jeżeli spuścimy je z jednakowej wysokości, to kartka później spadnie na ziemię, z powodu bowiem większej swej powierzchni musi ona rozsunąć więcej cząstek powietrza niż kulka, wskutek czego traci bardziej na prędkości. Gdyby ludzie, zamiast ślepo wierzyć w autorytet Arystotelesa, byli zadali sobie pracę wykonania ostatnio przytoczonego prostego doświadczenia, to łatwo przekonaliby się, jak błędnem jest zdanie — jeszcze do dziś dnia przez wielu wyznawane — że prędkość spadku zależy od ciężaru i od materyału spadającego ciała. Widzieliśmy, że przeciwnie: dwa ciała równego ciężaru i z tego samego materyału (kartka i kulka papierowa) spadają z niejednakową prędkością i że przyczyna tej różnicy wcale od czego innego zależy. Doświadczenie atoli dopiero w nowszych czasach zyskało moc rozstrzygającą w kwestyach nauki i my w tej książce tylko te poglądy będziemy uważali za ostatecznie dowiedzione, które udało się wprost stwierdzić na drodze doświadczalnej, albo które zostały wyprowadzone z danych, opartych na doświadczeniu.

To, cośmy wyżej powiedzieli o ciałach stałych, stosuje się w równej mierze do ciał płynnych i gazowych. Masa wody, spadając rozszczepia się na mnóstwo kropli, w końcu zaś na drobny pył, a to wskutek wielkiej ruchliwości swych cząstek i oporu powietrza. Zjawisko to występuje bardzo wyraźnie w naturalnych wodospadach, gdzie woda spada ze znacznej wysokości, jak to ma miejsce naprzykład z wodospadem „Staubbach“ (Staub—pył i Bach—strumień).

Natomiast w rurze, pozbawionej powietrza, woda spada jako spójna masa, zachowując przytem cylindryczny jej kształt i wydając przy uderzeniu dźwięk podobny do tego, jaki wydaje suche ciało stałe. Tak samo dym, wznoszący się w zwykłych warunkach w górę — a to dla przyczyn, które później poznamy, zamknięty w rurze, z której wypompowano powietrze, spada na dno, co pokazuje, że i gazy podlegają działaniu ciężkości.

Mimochodem zauważymy, że opór, jaki stawia powietrze spadającym ciałom, ma pewne znaczenie dla rolnictwa, które i tak już wiele cierpi od szkód, wyrządzanych przez grad. Bez tego oporu, najdrobniejsze krople deszczu, spadając z wysoko unoszących się chmur, uderzałyby o ziemię z wielką mocą i sprawiałyby groźne spustoszenia.

Drogą powyższych doświadczeń zyskaliśmy pierwsze prawo tyczące się działań ciężkości: *Wszystkie ciała w jednem i tem samem miejscu spadają w próżni z jednakową prędkością, niezależną od ich objętości, ani od ciężaru.*

§ 2. Spadek ciał. Kierunek spadku.

Kierunek działania siły ciężkości jest prostopadły do płaszczyzny poziomej danego miejsca, ta ostatnia zaś określa się niewielką powierzchnią spoczywającego płynu — zwykle wody. Uwiążmy na nitce jakiś ciężarek i przymocujmy drugi jej koniec do stałej podpory (fig. 4); zawieszony ciężarek spada ku ziemi i wypręża nitkę; kierunek, jaki przyjmuje ta ostatnia, gdy po kilku wahaniach przejdzie w stan spoczynku — nazywamy pionowym, sznurek zaś z ciężarem —pionem; przyrządem tym posługują się rzemieślnicy w celu pionowego ustawiania różnych przedmiotów. Jeżeli zawiesimy pion nad

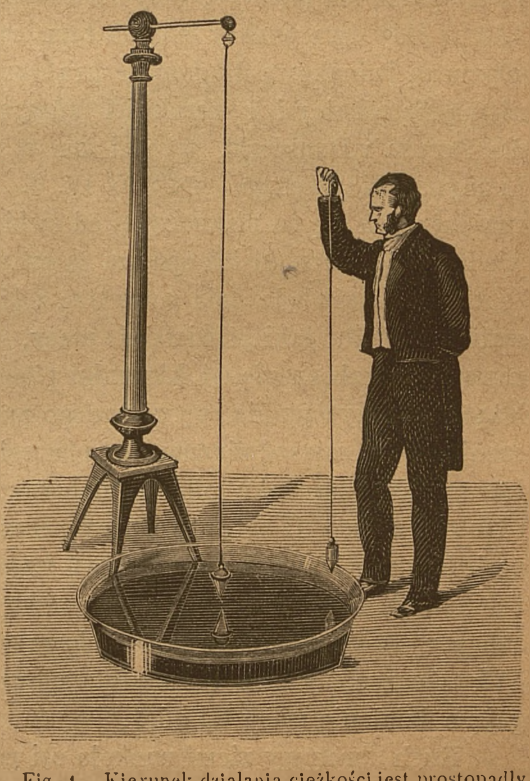


Fig. 4. Kierunek działania ciężkości jest prostopadły do powierzchni spoczywającego płynu.

powierzchnią spoczywającego płynu, naprzykład nad naczyniem napełnionem rtęcią, to zobaczymy, że kierunki wyprężonej nitki i jej obrazu stanowią prostą linię, co na mocy praw odbijania się światła, które później wyłuszczymy, pokazuje, że oba te kierunki są prostopadłe względem powierzchni płynu; tak samo się zachowuje inny pion, którego koniec trzymamy w ręku.

Jakeśmy już przedtem nadmienili, to różne linje pionowe nie są równoległe między sobą; przy nieznacznych jednak odległościach kąt, jaki one tworzą, jest tak mały, że nie daje się prawie wymierzyć. Pionowe dwu punktów, oddalonych od siebie na 31 metrów, przeciętnie tworzą kąt 1″, a jest to wielkość, którą astronomowie i geodeci zaledwie przy pomocy najczulszych przyrządów mogą jeszcze oznaczyć. Jeżeli będziemy brali na powierzchni ziemi punkty coraz bardziej oddalone od siebie, to kąt, utworzony przez ich pionowe, przybiera wszystkie wartości od 0^0 do 180^0. Gdy dwa punkty leżą na tym samym południku, a więc gdy mają jednakową długość geograficzną, wtedy kąt rzeczony równa się różnicy ich szerokości geograficznej; tak naprzykład: dla Paryża i Dunkierki wynosi on w przybliżeniu 2^0 12′, dla Londynu i Edynburga — 4^0 25′ i t. d. Tylko więc o ciałach, znajdujących się na nieznacznej od siebie odległości, możemy powiedzieć, że kierunki ich spadku są prawie zupełnie równoległe.

Jeżeli doświadczenia powyższe z pionem będziemy wykonywali w pobliżu jakiejś wielkiej masy, naprz. wysokiej góry, to zauważymy zboczenie od kierunku pionowego w stronę góry, zależące od przyciągania, wywieranego przez tę masę na pion. Zboczenie takie, zawsze nieznaczne, pierwsi obserwowali Bouguer i Lacondamine na stoku góry Chimborazo. W r. 1774 Maskelyn i Hutton zmierzyli kąt, utworzony przez dwa piony, pomieszczone jeden na północnej, drudzy zaś na południowej stronie góry Schihallion w Szkocji i znaleźli go równym 53″, podczas gdy kąt, obliczony z odległości dwu tych obranych punktów wynosi tylko 41″; zboczenie więc o 12″ zostało spowodowane przez przyciągające działanie masy tej góry.

Ruch obrotowy ziemi naokoło osi powoduje także zboczenie od kierunku spadku. Ciało, znajdujące się na pewnej wysoko-

ści, w punkcie *a*, spadłoby na ziemię w punkcie *A*, leżącym na tej samej pionowej, gdyby ziemia się nie obracała. Jeżeli natomiast ziemia się obraca, to w czasie, gdy ciało spada, punkt *a* opisuje łuk *aa*,, większy od łuku *AA*,, opisywanego przez punkt *A*. Ponieważ tedy ciało w chwili, gdy zaczyna spadać, posiada większą prędkość obrotową niż punkt *A* i takową zachowuje przez cały czas spadku, przeto spadnie ono nie w punkcie *A*, lecz w A,, leżącym bardziej na wschód (fig. 5). Zboczenie to jest żadne tam, gdzie prędkość = *o*, to jest na biegunach, staje się coraz większem w miarę tego, jak zbliżamy się od bieguna ku równikowi i na tym ostatnim dosięga *maximum*. Przy wysokości spadku = 100 metr., zboczenie to na równiku wynosi według obliczenia 33 milimetry. Słuszność tego teoretycznego wniosku, wynikającego z założenia, że ziemia się obraca, pierwszy stwierdził Benzenberg doświadczeniami, wykonanemi z wieży Michała w Hamburgu, później zaś Reich. Ten ostatni urządzał odnośne doświadczenia w miejscu, wolnem od ciągów powietrza, zmniejszających dokładność rezultatów, mianowicie w głębokim szybie jednej z kopalń frejburskich w Saksonji. Gdy spuszczał on kule metalowe z punktu *A* (fig. 5), znajdującego się u wejścia do szybu, takowe spadały nie w punkcie *B*, leżącym na tej samej pionowej, lecz w punkcie *B'*, położonym o 28 milimetrów dalej na wschód, przy głębokości szachtu = 158,5 metrom. Rezultat ten dostatecznie się zgadza z teoretycznie obliczonym — 26,6 milim. Opisane doświadczenia z drugiej strony możemy uważać za bezpośredni dowód ruchu obrotowego ziemi naokoło osi.

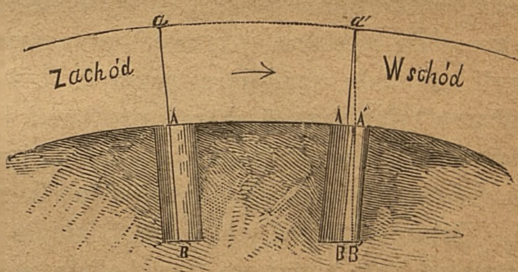


Fig. 5. Zboczenie ku wschodowi swobodnie spadających ciał.

§ 3. Prawa spadku ciał.

Galileusz w badaniach swych nad spadkiem ciał nie ograniczył się na obaleniu wyłuszczonego już przez nas błędu co do przyczyny nierównej prędkości spadających ciał. Zauważył on mianowicie, że prędkość ta staje się tem większą, im znaczniejszą jest wysokość spadku, i że droga, przebiegana przez ciało, rośnie w szybszym stosunku niż czas, innemi słowy, że ciało w następujących po sobie równych odstępach czasu przebywa coraz większe przestrzenie. Zapewne i przed nim zrobiono już podobne spostrzeżenie, jemu jednak bezsprzecznie należy się zasługa odkrycia praw tych zjawisk, t. j. stosunków, jakie zachodzą pomiędzy prędkością, drogą przebytą i czasem spadku. Drogą teoretycznego rozumowania doszedł on do wniosku, że prędkość spadającego ciała powinna wzrastać proporcyonalnie do czasu spadku, czyli, że ciało spadające przez 2, 3, 4 i t. d. razy dłuższy czas nabywa tyleż razy większej prędkości i stwierdził ten wniosek sławnemi doświadczeniami, noszącemi jego imię; mamy tu na myśli *doświadczenia Galileusza nad spadkiem ciał po równi pochyłej*.

Miarę siły, pod wpływem działania której ciężkie ciało, naprzykład kula metalowa, swobodnie spada na ziemię, daje nam jego ciężar; chcąc powstrzymać spadek takiego ciała, musimy na nie działać równym mu ciężarem w kierunku przeciwnym kierunkowi działania ciężkości. Gdy ciało spada swobodnie, wtedy ruch jego jest tak szybki, że nie możemy bezpośrednio obserwować dróg, jakie ono przechodzi w pewnych określonych odstępach czasu; rzecz się jednak zmienia, jeżeli spadek odbywa się nie w kierunku pionowym, lecz po równi pochyłej. Miarę siły, pod wpływem której kula a spada po równi pochyłej AB, daje nam ciężarek — przyczepiony za pomocą nici do kuli i przerzucony przez blok w sposób pokazany na fig. 6 — ściśle wystarczający do powstrzymania jej ruchu. Otóż przekonano się doświadczalnie, że jeżeli kierunek działania ciężarka — t. j. kierunek części nici, znajdującej się pomiędzy kulą a blokiem — jest równoległy do linii AB, to równowaga ma miejsce wtedy, gdy ciężarek jest tyle razy mniejszym od ciężaru kuli, ile razy AC (wysokość rów-

ni pochyłej) jest mniejszą od AB (jej długości). Naprzykład kulę, ważącą 10 kilogramów i znajdującą się na równi pochyłej, której wysokość do długości ma się jak 1 do 10, możemy utrzymać w równowadze 1 kil., na równi pochylej, dla której stosunek ten jest jak 1 do 20 — ciężarem $^1/_2$ kilogr. i t. d. Ciało więc spada po tych równiach pod wpływem 10, 20 i t. d. razy zmniejszonej niejako siły ciężkości, wskutek tego nabywa także, w tym samym czasie 10, 20 i t. d. razy mniejszej prędkości. Pojmujemy tedy, że dobierając odpowiednio nachylonej równi, możemy spadek ciała na tyle zwolnić, że drogi, przebywane przez nie w określonych odstępach czasu, dają się już bezpośrednio mierzyć, co pozwala wyprowadzić prawa spadku ciał pod wpływem siły ciężkości.

Rezultaty, otrzymane przez uczonego włoskiego, jakkolwiek wystarczyły do odkrycia praw spadku, nie są jednak dosyć dokładne. Do doświadczalnego wykazania tych praw używają przeto obecnie innych doskonalszych przyrządów, które teraz opiszemy. Przedtem jednak zaznaczymy jeszcze, że w XVII-ym wieku Riccioli i Grimaldi potwierdzili rezultaty Galileusza, spuszczając ciężkie ciała z różnych wież i mierząc czasy spadku przy pomocy wahadła, a w 1699 r. ojciec Sebastyan wynalazł nawet w tym celu stosowną maszynę. Dopiero jednak fizyk angielski Atwood zbudował maszynę, dającą bardziej dokładne rezultaty, a w nowszych czasach jenerał Morin wynalazł przyrząd samozapisujący wyniki doświadczeń.

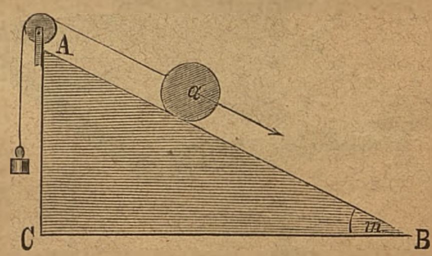


Fig. 6. Kula na równi pochyłej.

Atwood używa następującego sposobu do zwolnienia ruchu spadających ciał. Dwa dokładnie równe ciężary uwiązane są do dwu końców jedwabnego sznura, przerzuconego przez blok t. j. koło mające na obwodzie wyżłobienie; dla zmniejszenia tarcia oś bloka spoczywa nie w stałych panwiach, lecz na dwu parach — jednej z przodu, drugiej z tyłu — nieco zachodzących na siebie

kół (fig. 7). W takiem położeniu cały ten system pozostaje w spoczynku dlatego, że uwiązane ciężary wzajemnie się równoważą. Dla wprawienia go w ruch, należy na jednym z nich położyć jakiś nadciężarek: wtedy obie części sznura przesuwają się w kierunkach wręcz przeciwnych, zachowując jednak przytem pionowy kierunek i jeden ciężar — ten, na który kładziemy nadciężarek — spada, drugi zaś się wznosi. Łatwo atoli pojąć, że spadek będzie tem więcej zwolniony, im mniejszym jest nadciężarek w stosunku do ciężaru całej poruszającej się masy, t. j. bloka, nitki, obu ciężarów i nadciężarka. Przypuśćmy, że blok waży 3 gr., nitka — 1 gr., każdy z ciężarów — 10 gr., nadciężarek zaś — 1 gram, wtedy masa 25 gr. zostaje wprawioną w ruch przez siłę równą tylko ciężarowi 1 grama, podczas gdy w swobodnym spadku ta sama masa poruszałaby się pod wpływem własnego swego ciężaru, a więc siły równej ciężarowi 25 gr., czyli 25 razy większej.

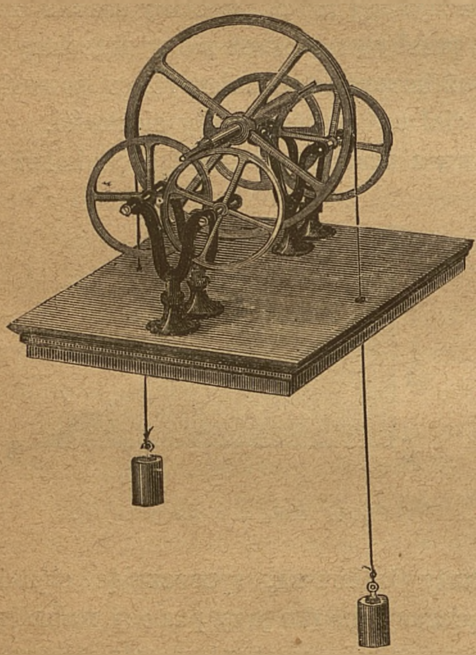


Fig. 7. Układ kół w maszynie Atwooda.

Spadek przeto w maszynie Atwooda, przy rzeczonym stosunku nadciężarka do ciężaru całej masy będzie taki sam, jak gdyby natężenie siły ciężkości było 25 razy mniejszem, przyczem same prawa spadku zostają niezmienione. Wskutek tak zwolnionego ruchu, obserwacya jest bardzo ułatwioną; dla uczynienia jej możliwie dokładną, cały przyrząd zbudowany jest (fig. 8) jak następuje:

Płyta drewniana (przedstawiona oddzielnie na fig. 7) wraz ze znajdującemi się na niej kołami, przedziurawiona w dwu punktach dla przepuszczenia sznura, umieszczoną jest poziomo na słu-

pie, 3 metry długim, ustawionym prostopadle na ciężkiej drewnianej podstawie, której za pomocą szrubek możemy nadać położenie poziome.— Z lewej strony słupa znajduje się skala, dokładnie podzielona na centymetry, pozwalająca odczytywać drogi, jakie przebywa spadający przed nią ciężar. — W dowolnem miejscu możemy przyszrubować do skali talerzyk, o który uderza spadający przed nią ciężar, wydawanym przy tem dźwiękiem zdradzając koniec swego ruchu; oprócz tego, także w dowolnem miejscu, lecz zawsze wyżej od talerzyka, daje się do niej przymocować pierścień, który swobodnie przepuszcza ciężar, zatrzymuje zaś położony na tym ostatnim nadciężarek z powodu wydłużonego jego kształtu. Przed rozpoczęciem ruchu, ciężar spoczywa na podstawce, znajdującej się przy

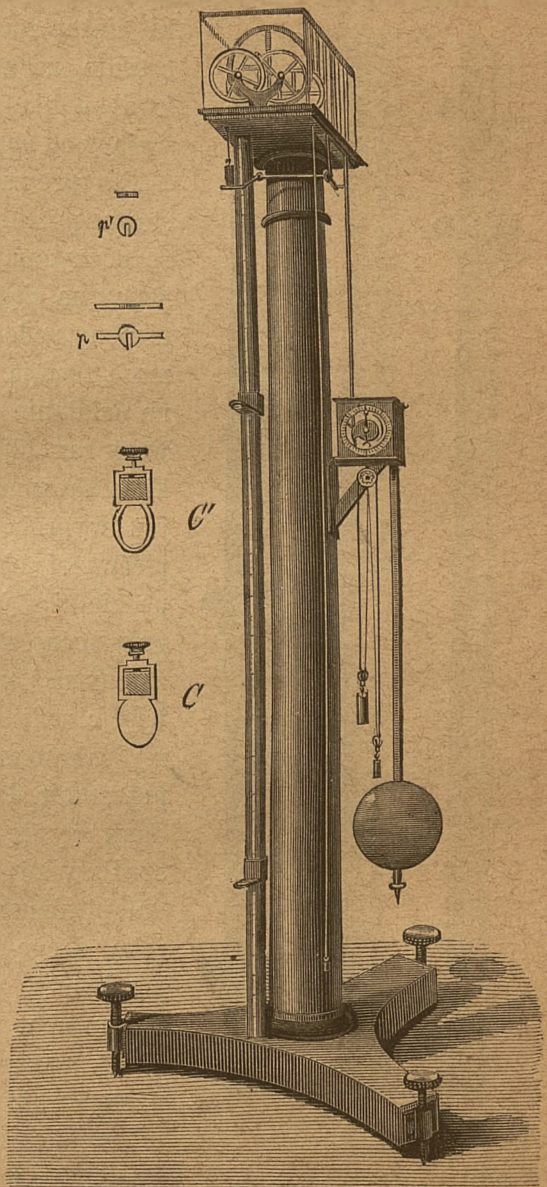
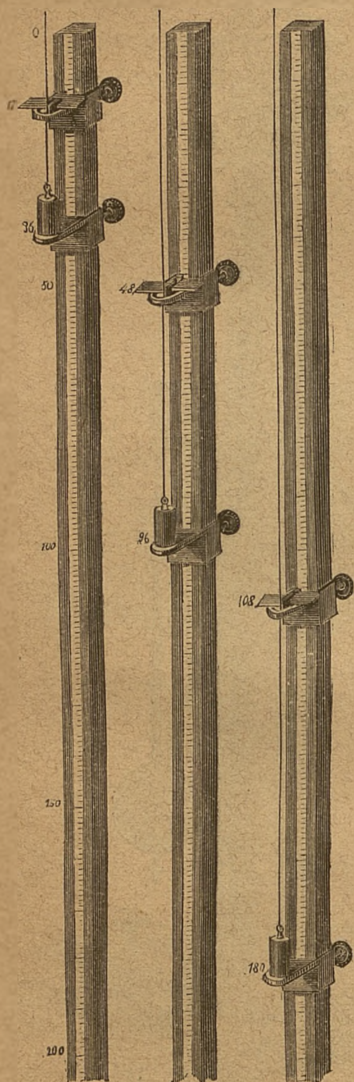


Fig. 8. Maszyna Atwooda.

o skali i połączonej z zegarem głośno bijącym sekundy za pomocą mechanizmu tak urządzonego, że z chwilą usunięcia podstawki ciężar zaczyna spadać, a jednocześnie zegar zaczyna bić, co pozwala dokładnie mierzyć czas, upływający od początku spadku.



a b c

Fig. 9. Ilustracja prawa prędkości.

Przyprowadziwszy przyrząd do stanu, przedstawionego na fig. 8, rozpoczynamy doświadczenia. Połóżmy na ciężarze nadciężarek *p* i usuńmy podstawkę. W tej chwili masa zostaje raptownie wystawioną na działanie ciężkości, zegar pierwszy raz bije i ciężar z nadciężarkiem zaczyna spadać. Poprzednio już wypróbowaliśmy, że w końcu pierwszej sekundy dobiega on do 12 podziałki; jeżeli w tem miejscu przymocujemy pierścień (fig. 9*a*) to zatrzyma on nadciężarek, w tej więc chwili siła, pod wpływem której cała masa się poruszała, nagle przestanie działać, sam ciężar jednak się nie zatrzyma, lecz, przeszedłszy swobodnie przez pierścień, dalej będzie spadać. Chcąc wiedzieć, jaką drogę przebywa on w ciągu 2 sekundy, musimy talerzyk przymocować w takiem miejscu skali, ażeby uderzenie ciężaru o talerzyk następowało jednocześnie z drugiem uderzeniem zegaru; za pomocą kilku prób przekonywamy się, że dzieje się to wtedy, gdy talerzyk znajduje się przy podziałce 36, co pokazuje, że ciężar w 2 sekundę przebył drogę równą 24 cent. (od 12 do 36). W podobny spo-

sób dowiadujemy się, że i w 3, 4, 5 i t. d., jednem słowem w każdą sekundę od chwili ustania działania nadciężarka, ciężar przebywa tę samą drogę 24 cent., t. j. że wtedy w jednakowych odstępach czasu przechodzi równe drogi. Dla znalezienia więc drogi, jaką ciało, po ustaniu działania na nie siły, przebywa w pewnym czasie, należy drogę, przebywaną w ciągu jednej sekundy— drogę tę nazywamy w tym wypadku prędkością ruchu — pomnożyć przez liczbę sekund, w ciągu których ono się porusza. Z tego już wynika, że prędkość równa się drodze, podzielonej przez czas i że czas równa się drodze, podzielonej przez prędkość. Ruch taki nazywamy *jednostajnym*.

Pozwólmy teraz nadciężarkowi *p* działać, zamiast przez 1, przez 2, 3 i t. d. sekundy. Próby pokazują, że w tym celu należy pierścień umieścić przy podziałce 48, 108 i t. d. W każdym wypadku ruch spadającej masy, po zatrzymaniu nadciężarka, jest jednostajny, jak o tem możemy się przekonać zapomocą prób powyżej opisanych. Z doświadczeń tych i wielu innych jeszcze, dających ten sam rezultat, wynika, że po ustaniu działania siły na ciało, to ostatnie porusza się dalej z jednostajną prędkością. Prędkość ta jednak jest tem większą, im dłużej działa siła: Jeżeli pierścień umieścimy przy 12 podziałce, a więc gdy nadciężarek *p* działa przez 1 sek., wtedy ciężar w następną sekundę przebywa drogę 24 cent. — od 12 do 36 podziałki (fig. 9*a*); gdy pierścień znajduje się przy 48 — gdy nadciężarek *p* działa przez 2 sek.— to ciężar podczas następującej sek. przechodzi drogę 48 cent. — od 48 do 96 podz. (fig. 9*b*); po 3 sek. prędkość równa się 72 cent. — od 108 do 180 pod. (fig. 9*c*) i t. d.

Po 1 sek. prędkość równa się. . .	24 cent.
,, 2 ,, ,, ,, ,, . . .	$48 = 24 \times 2$
,, 3 ,, ,, ,, ,, . . .	$72 = 24 \times 3$ i t. d.

Gdybyśmy użyli innego nadciężarka do poruszenia tej samej masy, to prędkość jej w końcu 1-szej sek. byłaby także inną, ale w końcu 2, 3 i t. d. sekundy — również 2, 3 i t. d. razy większą, niż po upływie 1 sekundy. Doświadczenia te pokazują, że

prędkość ciała, spadającego pod wpływem ciężkości, wzrasta proporcyonalnie do czasu. Ruch, którego prędkość zmienia się zgodnie z tem prawem, nazywamy *jednostajnie przyśpieszonym*, sam zaś przyrost prędkości w ciągu 1 sekundy — *przyśpieszeniem*, (w powyższych przykładach wynosi ono 24 cent.); jeżeli przy tem w początku ciało nie posiada żadnej prędkości, jak to ma miejsce w omówionych doświadczeniach, to prędkość w końcu 1-szej sek. równa się przyśpieszeniu.

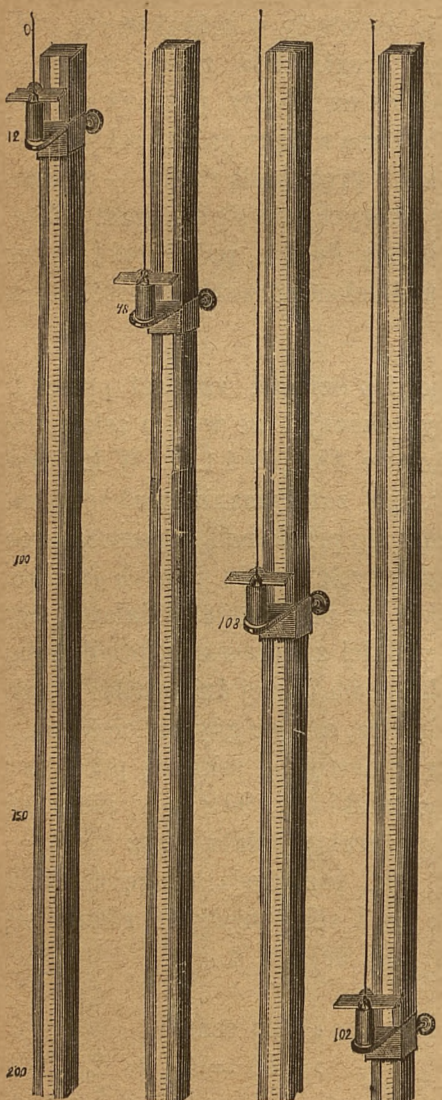


Fig. 10. Ilustracya prawa dróg w ruchu jednostajnie przyśpieszonym.

Zbadawszy zależność, zachodzącą pomiędzy prędkością spadającego ciężaru, a czasem działania nań siły, zobaczmy teraz, w jakim stosunku znajduje się do tego czasu droga przebyta. Ponieważ chodzi tu o to, ażeby nadciężarek działał przez cały czas spadku, pierścień więc, który go zatrzymuje, jest już teraz zbyteczny i dlatego przy poniższych doświadczeniach zdejmujemy go. Za pomocą kilku prób dowiadujemy się, że talerzyk należy umieścić przy 12, 48, 108, 192 i t. d. podziałce, ażeby spadający ciężar wraz z nadciężarkiem uderzał oń po upływie 1, 2, 3, 4 i t. d. sek. (fig. 10).

Drogi więc przebyte podczas działania nadciężarka są następujące:

po 1 sek.	. . . .	12 cent.
„ 2 „	. . . .	48 = 12 × 4
„ 3 „	. . . .	108 = 12 × 9
„ 4 „	. . . .	192 = 12 × 16 i t. d.

Z tego widzimy, że dla znalezienia drogi, jaką spadające ciało przebywa po 2, 3, 4 i t. d. sekundach, należy drogę, w ciągu pierwszej sekundy pomnożyć przez 4, 9, 16 i t. d. t. j. przez kwadrat z liczby sek. od początku ruchu. Gdybyśmy do powyższych doświadczeń użyli innego nadciężarka, to dla dróg otrzymalibyśmy wprawdzie inne liczby, ale stosunek ich byłby ten sam. Możemy tedy drugie prawo spadku, odkryte już dawniej przez Galileusza, sformułować jak następuje: *Droga, jaką przechodzi ciało, spadające pod wpływem ciężkości, wzrasta proporcyonalnie do kwadratu z czasu, upłynionego od początku ruchu.*

Zobaczmy teraz, jakie drogi przebywa spadające ciało w każdą oddzielną sekundę. W opisanych doświadczeniach przyśpieszenie wynosi 24 cent., o tyle bowiem wzrasta prędkość w ciągu każdej sekundy, (jak to dobrze uwydatnia fig. 9), droga zaś przebyta podczas pierwszej sek. równa się 12 cent. a więc połowie; przy innym stosunku nadciężarka do ciężaru całej poruszającej się masy, przyspieszenie byłoby innem, ale zawsze droga w ciągu pierwszej sekundy byłaby dwa razy od niego mniejszą. Widzimy tedy, że *droga przebyta w ciągu pierwszej sek. przez ciało, spadające pod wpływem ciężkości, równa się połowie przyśpieszenia.*

Podczas pierwszej sek. ciało przebywa drogę 12 cent., podczas dwóch pierwszych sek. 48 c., a więc podczas samej tylko drugiej sek. 36, podczas trzech pierwszych sek. 108 cent., a więc w ciągu samej tylko trzeciej — 60 cent. i t. d.

Droga w 1-szej sek.	. .	12 c. = 12 × 1
„ „ 2-ej „	. .	36 „ = 12 × 3
„ „ 3-ej „	. .	60 „ = 12 × 5 i t. d.

Ten sam stosunek otrzymalibyśmy, używając innego nadciężarka, co pokazuje, że *drogi w oddzielnych następujących po sobie*

sekundach, przebywane przez ciało spadające pod wpływem ciężkości, mają się do siebie jak szereg liczb nieparzystych.

Poprzednio podaliśmy już prawo, wyrażające zależność pomiędzy prędkością i czasem spadku (fig. 9). Przedstawione na tej figurze doświadczenia pozwalają także wyrazić stosunek pomiędzy prędkością a drogą przebytą. Przypominamy tu raz jeszcze, że części skali od 0 do podziałki, przy której znajduje się pierścień, przedstawiają drogi przebyte w ciągu 1-ej, 2-ch, 3-ch i t. d. sekund, od pierścienia zaś do talerzyka—prędkości w końcu 1-ej, 2-ej, 3-ej i t. d. sekundy. Mamy więc:

Czas	1″	2″	3″
Drogi	12 . . .	48 = 12 × 4 . . .	108 = 12 × 9 i t. d.
Prędkości	24 . . .	48 = 24 × 2 . . .	72 = 24 × 3 i t. d.

Ciało więc, spadając z 4, 9, 16, 25 i t. d. razy większej wysokości, nabywa 2, 3, 4, 5 i t. d. razy większej prędkości; przy innym nadciężarku otrzymalibyśmy ten sam rezultat. Gdy z dwu liczb jedna, będąc pomnożona przez samą siebie, daje drugą, to pierwszą nazywamy pierwiastkiem kwadratowym tej drugiej, tak naprzykład: 2 jest pierwiastkiem kwadrat. 4, 3—9, 4—16, 5—25 i t. d. Otóż, w powyższej tabliczce liczby wyrażające, ile razy prędkość w końcu 2-ej, 3-ej i t. d. sek. jest większą niż w końcu pierwszej sek., są pierwiastkami kwadratowemi liczb wyrażających, ile razy droga przebyta w 2, 3 i t. d. sek. jest większą, niż droga w pierwszej sekundzie. Rezultat tych doświadczeń możemy więc sformułować w ten sposób: *prędkość ciała spadającego wzrasta proporcyonalnie do pierwiastku kwadratowego z drogi przebytej.*

Trzy ostatnie prawa, któreśmy tu wykazali doświadczalnie, wynikają zresztą już z zasadniczego prawa spadku — z prawa dróg. Prawo to możemy nadto stwierdzić i na ciele, spadającem pod działaniem niezmniejszonej siły ciężkości, za pomocą maszyny, zbudowanej, według pomysłu Poncelet'a, przez Morina. Zasadniczą część tej maszyny stanowi cylindryczny ciężarek, ku dołowi stożkowato zaostrzony, który spada pomiędzy dwoma wyprężonemi drutami, kreśląc przy tem przymocowanym doń ołów-

kiem linię na znajdującej się za nim kolumnie, oblepionej w tym celu papierem — (fig. 11).

Gdyby kolumna pozostawała nieruchomą, wtedy ołówek ciężarka nakreśliłby na papierze, podczas spadku, linię pionową, z której nie dałby się wyprowadzić żaden wniosek co do wielkości dróg, przebytych przezeń w każdą sekundę. Kolumna jednak—przy pomocy odpowiedniego mechanizmu, którego urządzenie nas tu bliżej nie obchodzi— obraca się naokoło swej osi z jednostajną prędkością, a ołówek kreśli wtedy na papierze linię krzywą, której własności odrazu dają poznać prawo spadku.

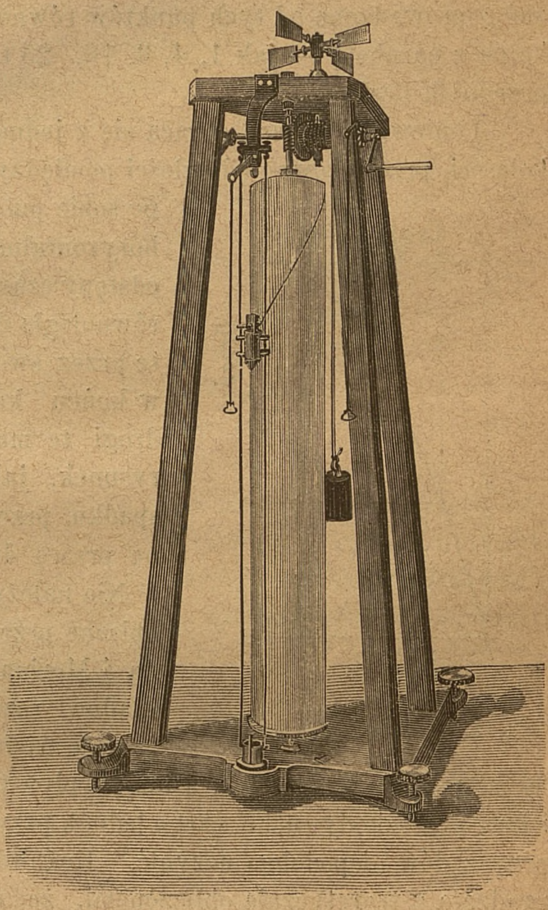


Fig. 11. Maszyna Morina.

Gdy mianowicie, zdjąwszy papier z kolumny, rozwiniemy go, to znajdziemy na nim nakreśloną linię, znaną w geometryi pod nazwą *paraboli*, która ma następującą własność — (fig. 12). Jeżeli przez najwyższy jej punkt-wierzchołek przeprowadzimy linię pionową — t. z. oś paraboli i horyzontalną i z dowolnych punktów paraboli opuścimy prostopadle na każdą z tych linij (na rysunku prostopadle te są przedsta-

wione przez linie kropkowane, to odległości [1]) tych punktów od linii horyzontalnej mają się do siebie jak kwadraty z odległości tychże punktów od osi. Jeżeli oddzielimy naprzykład na linii horyzontalnej, począwszy od 0, 5 równych części, to odległości punktów podziału od 0 mają się do siebie, jak 1, 2, 3, 4, 5, linie zaś poprowadzone od tych punktów równolegle do osi aż do spotkania z parabolą — jak 1, 4, 3, 16, 25 t. j. jak kwadraty poprzednich liczb.

Ponieważ kolumna obraca się z jednostajną prędkością naokolo osi, przeto równe odległości pomiędzy dwoma następującemi po sobie punktami podziału na linii horyzontalnej przedstawiają równe odstępy czasu, kropkowane zas linie równoległe do osi — drogi przebyte przez swobodnie spadające ciało w końcu każdego odstępu czasu; drogi te mają się, jak pokazuje rysunek, jak kwadraty z czasów spadku, przez co zostaje dowiedzione prawo dróg spadku.

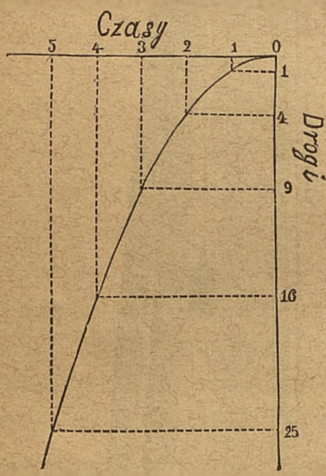


Fig. 12. Ilustracya prawa dróg spadku.

Nie należy zresztą sądzić, ażeby opisane przez nas maszyny Atwooda i Morina dawały absolutnie dokładne rezultaty; do tego brak jeszcze wielu warunków: należałoby mianowicie w tym celu usunąć wpływ tarcia, opór powietrza i inne przeszkody ruchu, czego jednak przy używaniu powyższych przyrządów niepodobna uczynić. Rezultaty te na tyle atoli się zgadzają z teoretycznie obliczonemi, że możemy je uważać za doświadczalne stwierdzenie praw spadku.

Doświadczenia, wykonane za pomocą równi pochyłej i maszyny Atwooda, polegają na tem, że sztucznie zmniejszamy natężenie siły ciężkości, a przez to i prędkość spadającego ciała, przy

[1]) Odległość jakiegoś punktu od pewnej linii mierzy się wielkością prostopadłej, opuszczonej zeń na tę linię.

czem jednak same prawa spadku — wyrażające stosunek między czasem prędkością i drogą — zostają niezmienione. Wskutek jednak tego zmniejszenia działającej siły, a także wskutek przeszkadzającego wpływu tarcia i oporu powietrza doświadczenia te nie pozwalają bezpośrednio oznaczyć drogi, jaką przebyłoby ciało swobodnie spadające w próżni po upływie pewnego czasu, albo prędkości, jakiej ciało takie nabyłoby w końcu 1-szej sekundy, czyli przyśpieszenia; doświadczenia z maszyną Morina także nie dają nam dokładnej wielkości tego ostatniego i w nich bowiem spadek ciała nie jest wolnym od przeszkód. Jakiej metody należy użyć, aby ściśle oznaczyć przyśpieszenie swobodnego spadku, o tem dowiemy się w następnym rozdziale, tutaj zaś zaznaczymy tylko, że przyspieszenie to, będące miarą natężenia siły ciężkości, nie jest jednakowem we wszystkich punktach na powierzchni ziemi, lecz zmienia się wraz z szerokością geograficzną, dalej zależy od lokalnego ukształtowania skorupy ziemskiej, a także od większej lub mniejszej odległości punktu, z którego ciało spada, od środka ziemi.

Jeżeli więc teraz wprowadzimy pewne wartości liczebne, to nie należy zapominać, że stosują się one tylko do spadku w próżni, do doświadczeń wykonywanych bardzo blizko powierzchni ziemi i do pewnego ściśle określonego punktu obserwacyjnego, naprzykład, jak w poniżej podanych liczbach, do obserwatoryum paryskiego.

W takich warunkach, ciało w końcu pierwszej sekundy nabywa prędkości 9,8094 metr. — takiem więc będzie przyśpieszenie dla Paryża [1]). W ciągu 1-szej sek. cialo przebywa drogę równą połowie przyśpieszenia, a więc 4,9047 m.

po 2	sekundach	droga	równa się	19,619 m.	(4,9047 × 4)
„ 3	„	„	„	44,142 „	(4,9047 × 9)
„ 4	„	„	„	78,475 „	(4,9047 × 16)
„ 5	„	„	„	122,618 „	(4,9047 × 25)

i t. d.

[1]) W Warszawie przyśpieszenie wynosi 9,81195 metr.

W podobny sposób moglibyśmy obliczyć także czas, jakiego potrzebuje ciało na to, ażeby spaść z pewnej wysokości, oraz prędkość, jaką ma przy spadnięciu na ziemię. Otrzymalibyśmy naprzykład następujące wartości:

Wysokość spadku w metrach	Czas spadku w sekundach	Prędkość nabyta w metrach
1	0,45	4,429
2	0,64	6,264
3	0,78	7,672
4	0,90	8,858
5	1,01	9,904
10	1,43	14,006
100	4,51	44,203

Ażeby więc spaść z wysokości 100 metrów, ciało potrzebowałoby nieco więcej niż $4^1/_2$ sekundy i nabyłoby w końcu spadku prędkości równej 44,2 m.

Przypominamy tu raz jeszcze, że, wskutek oporu powietrza, w praktyce rezultaty się różnią od powyżej podanych, i że wielkość tego oporu zależy od stosunku masy spadającego ciała do jego powierzchni, a także od jego kształtu. Bardzo ciekawemi pod tym względem są doświadczenia, wykonane w XVII wieku przez fizyka Désaguliers'a w obecności Newtona, Halleya, Derhama i innych uczonych. Spuszczał on na ziemię z wysokości 88,35 metr. — z latarni znajdującej się ponad kopułą ś-go Pawła w Londynie — różne ciała, jak kule ołowiane o średnicy 54 milimetrów i pęcherze wypełnione powietrzem o średnicy 135 mil. Kule przebyły tę przestrzeń w ciągu $4^1/_2$, pęcherze natomiast dopiero po upływie $18^1/_2$ sekund; w próżni tak jedne jak i drugie przebyłyby tę drogę w ciągu $4^1/_4$ sek.

PROSPEKT.

Dzieło A. Guillemin'a „Le monde physique", które w niniejszem opracowaniu wydajemy, przedstawia w sposób przystępny najciekawsze i najważniejsze zjawiska fizyczne. Jest ono przeznaczone dla szerokiego ogółu, który nie posiadając ścisłych wiadomości matematycznych, pragnąłby zapoznać się ze zjawiskami otaczającej przyrody. Znajomość tych zjawisk niezbędną jest dla każdego wykształconego człowieka, zwłaszcza dziś, kiedy nauki przyrodnicze odgrywają tak potężną rolę w postępie myśli ludzkiej. Jaka jest wartość dzieła Guillemin'a świadczy już to jedno, że doczekało się ono w krótkim czasie kilku wydań francuzkich, przekładu niemieckiego, oraz dwóch wydań przekładu angielskiego, dokonanego przez słynnego fizyka Prof. Lockeyera.

Pragnęlibyśmy, aby polskie opracowanie dzieła niniejszego nie ustępowało w niczem świetnym wydaniom francuzkim, niemieckim i angielskim i dla tego pomimo wielkiego nakładu zamówiliśmy u pierwszorzędnych drzeworytników około 600 drzeworytów i do dwudziestu tablic i chromolitografij; wyrazisty druk i piękny satynowany papier przyczynią się również do estetycznego wydania niniejszego dzieła.

Opracowanie powierzyliśmy specyalistom, którzy niewątpliwie wywiążą się dobrze i sumiennie ze swego zadania.

Dzieło to będzie wychodziło zeszytami (w liczbie około 30) w dwutygodniowych odstępach czasu, a cena każdego zeszytu wynosić będzie kop. 20.

Warszawa. Księgarnia nakładowa

H. Olawski.

Дозволено Цензурою — Варшава 9 Марта 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop.

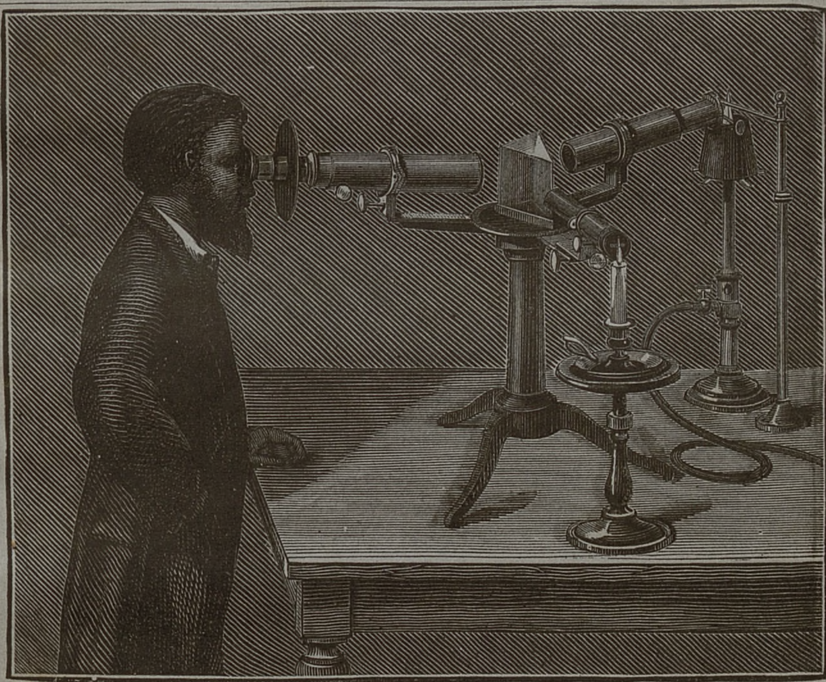
Zeszyt 2.

Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

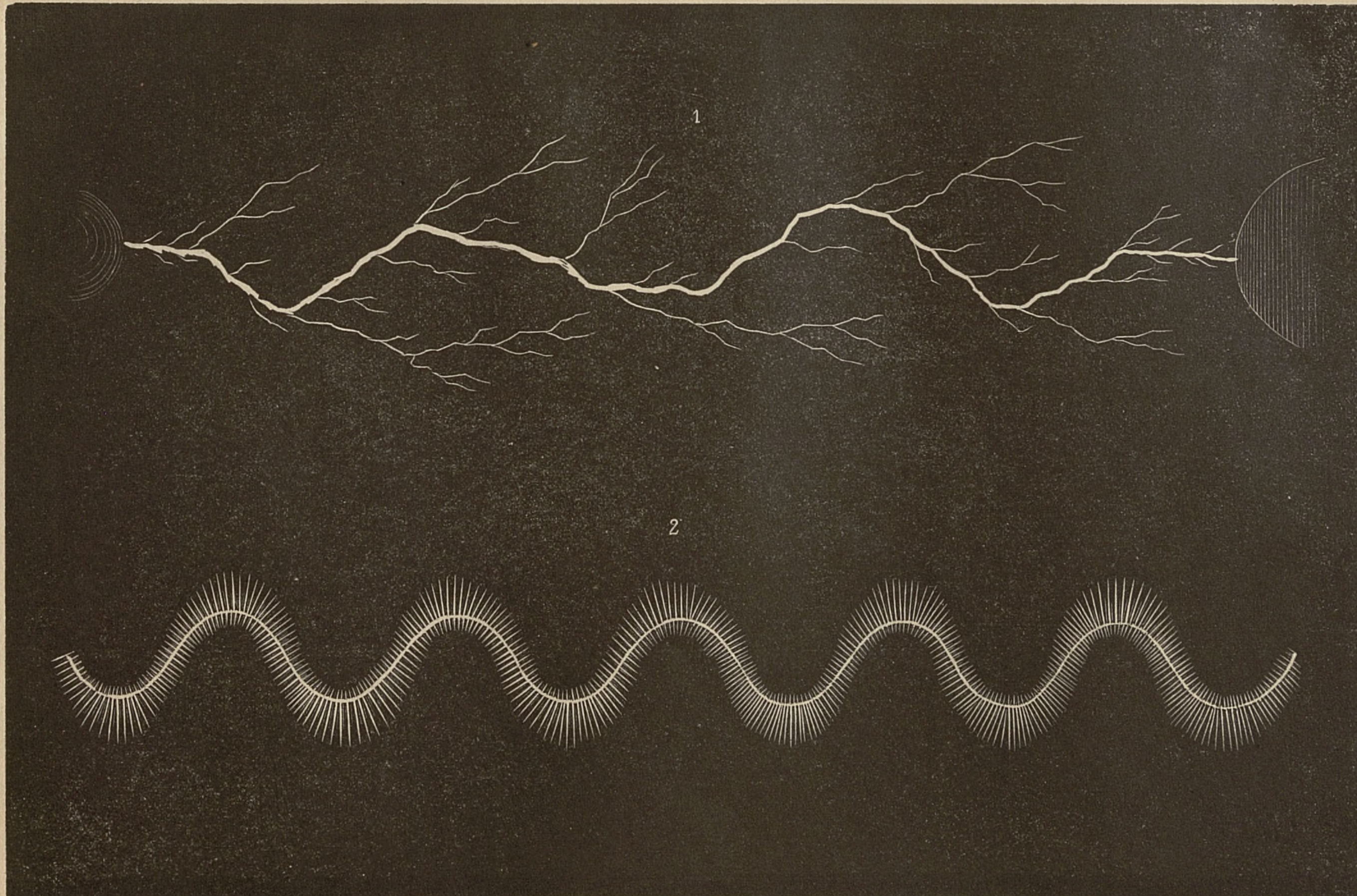
Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego,** ul. Mazowiecka № 6.

1889.



Tabl. II. **Kształt wyładowań elektrycznych** według **Van Marum'a.**

Дозв. Ценз. Варшава, 9 Марта 1889 г.
Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

ROZDZIAŁ III.

Wahadło.

§ 1. Równość czasu wahnięć wahadła. Stosunek czasu wahnięcia do długości wahadła.

Opowiadają, że Newton, znajdując się pewnego dnia w swym ogrodzie w Woolstrop, zauważył, jak jabłko oderwało się od drzewa i spadło na ziemię. Codzienne to zdarzenie, według tegoż opowiadania, było powodem, że zaczął zastanawiać się nad tem, czy tajemnicza siła, odrywająca jabłko od drzewa, działająca na wszystkie ciała bez względu na to, czy znajdują się one w głębokościach dolin, czy na wierzchołkach gór, nie rozpościera jeszcze dalej swego wpływu, czy i księżyc np. nie podlega jej działaniu? Genialny badacz oddał się z zapałem temu zagadnieniu, niestety jednak, oparł on początkowe swe obliczenia na błędnych rezultatach pomiarów południka ziemskiego i dlatego obliczenia te wypadły niezadawalniająco. Dopiero po dwudziestu prawie latach, gdy dokonano nowych, dokładniejszych pomiarów, udało się Newtonowi otrzymać cyfry, zupełnie zgodne z obserwacyą. W ten sposób wzniesionym został gmach, do którego podstaw dostarczyli Kepler, Galileusz i Huyghens; następcy zaś Newtona pracowali ciągle i do ostatnich czasów nad wykończeniem i uzupełnieniem tego gmachu: mamy tu na myśli naukę o *ciążeniu powszechnem*.

Podobny do powyższego przypadek, jeżeli go tak nazwać można, był również powodem badań, rozpoczętych przez Galileusza nad ruchem wahadła. Będąc jeszcze studentem w Pizie, znajdował się on pewnego razu na nabożeństwie w kościele. Mało zwracając uwagi na odbywającą się ceremonię, skierował wzrok na drogocenny świecznik, arcydzieło Benvenuta Celliniego, wiszący na długim sznurze przed ołtarzem i odbywający powolne wahania w jednę i drugą stronę. Kołysania świecznika stawały się coraz powolniejszemi, a jednak czas pojedyńczego wahnięcia nie ulegał zmianie [1]). Zjawisko to wielce zdziwiło Galileusza; stwierdził

[1]) Bertrand „Galileusz i jego dzieła.“

on później słuszność swej obserwacyi za pomocą doświadczeń, urządzonych w mieszkaniu i znalazł zarazem stosunek, jaki zachodzi pomiędzy czasem jednego wahnięcia, a długością nitki, na której uwiązany był wahający się ciężar. Lecz dopiero długo po nim, mianowicie w r. 1673, Huyghens uzupełnił piękne to odkrycie i podał matematyczne prawo ruchu wahadła. Prawo to chcemy obecnie wyłuszczyć i pokazać zarazem jaki jest jego związek z siłą ciężkości.

Wyobraźmy sobie, że na dolnym końcu nitki niewyciągalnej i nieważkiej uwiązane jest nieskończenie małe, lecz ciężkie ciało *M*, górny zaś koniec nitki przymocowany jest w *A* (figura 13). Ciężar wypręża nitkę i zmusza ją do zajęcia pionowego położenia. Cały ten system znajduje się w spoczynku. Jeżeli, przy ciągle wyprężonej nitce, odchylimy ciało z *M* do *M''*, to siła ciężkości i w tem nowem jego położeniu nie przestaje nań działać. Wiemy, że, wskutek działania tej siły, ciało dąży do zajęcia jak najniższego położenia, w danym też wypadku zacznie ono spadać na dół; gdyby było swobodnem, spadałoby w kierunku linii *M''G*, to jest w kierunku pionowym, lecz sprzeciwia się temu nitka, według określenia naszego, nie dająca się wyciągnąć, dla tego też ciało spada wzdłuż krzywej linji *M''M*, czyli po łuku koła, środek którego znajduje się w *A*. Drogę z *M''* do *M* ciało przebywa ruchem przyśpieszonym, gdyż opuszcza się ku dołowi pod wpływem siły ciężkości, przyczem prędkość, jaką ono posiada w punkcie *M*, zależy od wysokości spadku, którą mierzy się tylko w kierunku pionowym, a więc w naszym przykładzie będzie to wysokość *aM*. Rezultat działania siły ciężkości jest tutaj taki sam, jak gdyby ciało spadło bezpośrednio z *a* do *M*. Teoretycznie daje się dowieść, że gdy ciało spada z pewnej wysokości, to niezależnie od linii po jakiej spada, posiada w końcu taką prędkość, że może ono przy odpowiednich warunkach znowu wznieść się do tej samej

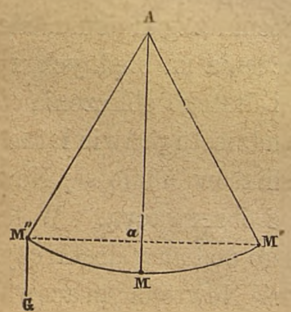


Fig. 13. Oscylacyjny ruch prostego wahadła.

wysokości. W naszym przykładzie ciało posiada w punkcie *M* taką prędkość, że wznosi się do punktu *M'*, leżącego na tej samej poziomej linii, co i punkt *M''*,, opisując łuk *MM'*, równy łukowi *MM''*. Drogę z *M* do *M'* przebywa ono wbrew działaniu siły ciężkości, która niemniej jednak wywiera swój wpływ, t. j. zmniejsza stopniowo prędkość ciała, przez co ruch jego ku górze jest opóźniony; w punkcie *M'* prędkość ta staje się równą zeru i ciało spada napowrót. Ponieważ warunki są te same, co i w punkcie *M''*, ciało, spadając wykona taki ruch jak przedtem, to jest znów opuści się do *M*, następnie podniesie się do *M''* i tak dalej. Ruch ten trwałby wiecznie, gdyby nie opór powietrza i tarcie w punkcie przyczepienia nitki, które osłabiają i w końcu zatrzymują poruszenia ciała.

Przyrząd, który tutaj opisaliśmy, nosi nazwę *prostego* czyli *matematycznego* wahadła. Ściśle mówiąc, przyrząd taki istnieje tylko w teoryi, zbudować go nie można, niema bowiem nici nieważkich i niewyciągalnych, a i uwiązane na nitce ciało nie może być zredukowanem do jednego punktu. Dlatego też w praktyce musimy się zadowolnić przyrządem, podobnym tylko do powyżej opisanego i noszącym nazwę *złożonego* albo *fizycznego* wahadla,

Cały ruch od *M''* do *M'* nazywamy *wahnięciem*; czas, potrzebny do jego wykonania — *czasem wahnięcia*, wielkość zaś łuku, przebieżonego od pionowego położenia — *amplitudą wahnięcia*.

Weźmy wahadlo, możliwie zbliżone do matematycznego — dajmy na to bardzo małą, ciężką kulkę, uwiązaną na nici — odchylmy je na mały kąt (nie więcej nad 3^0) od położenia pionoweno i policzmy liczbę jego wahań w pewnym określonym czasie. Niechaj w ciągu 1 minuty wykona ono 40 wahań, czas więc jednego wahnięcia wynosi 1 $^1/_2$ sek. Z postępem czasu kołysania wahadła stają się coraz mniejsze, w końcu zaś tak nieznaczne, że możemy je zauważyć jedynie za pomocą lunety, skierowanej na nić wahadła, ale i wtedy będzie ono w tymże czasie wykonywało tyleż wahań, co i w początku. Gdybyśmy odchylili wahadło od położenia pionowego na wielki kąt, naprzykład na 40^0, to zobaczylibyśmy, że do wielkich wahań wymaga ono dłuższego czasu, niż do małych. Z doświadczeń tych wyprowadzamy

pierwsze prawo wahadła, odkryte już przez Galileusza: *Czas małych wahnięć jednego i tego samego wahadła jest niezależnym od amplitudy wahania; wahania są izochroniczne (od greckich wyrazów: izos—równy i chronos—czas), czyli że wahadło do ich wykonania potrzebuje jednakowego czasu.* Może się to wydać na pierwszy rzut oka dziwnem, że wahadło, odchylone na większy kąt, a więc przebiegające większy łuk, czyni to w tym samym czasie, co i wahadło odchylone na mniejszy kąt, mające do przebycia mniejszą drogę, mniejszy łuk. Stanie się to jednak zrozumiałem, skoro uprzytomnimy sobie, że w pierwszym wypadku wahadło, jako bardziej odchylone, spada z większej wysokości, a więc według praw spadku, nabywa także większej prędkości, wskutek czego może przebyć większą drogę w tym samym czasie, co i w drugim razie, gdy przebiega mniejszy łuk. Jednakże prawo powyższe, jak to pokazuje rachunek i doświadczenie, stosuje się jedynie, i to z pewnem tylko przybliżeniem, do wahań o małej amplitudzie, nie przenoszącej 3°.

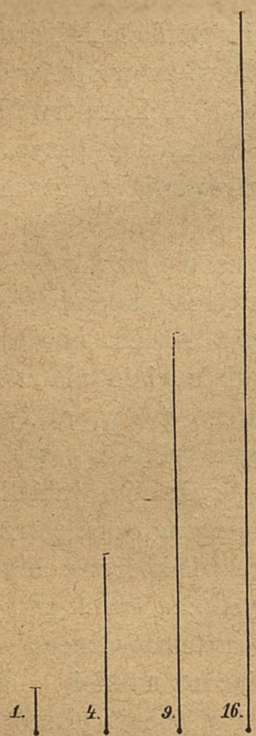


Fig. 14. Zależność czasu wahnięcia od długości wahadła.

Uwiążmy teraz na końcach jednakowo długich nitek kulki o różnym ciężarze i z rozmaitego materyału, naprzykład platynową, ołowianą, drewnianą i t. d. i wyprowadźmy je jednocześnie z pionowego położenia; zobaczymy, że wszystkie te wahadła wykonywają jedno wahnięcie w tym samym czasie, co dowodzi, że *czas wahnięcia wahadła nie zależy od jego ciężaru, ani od materyału.*

Zbadajmy obecnie stosunek, jaki zachodzi między czasem wahnięć różnych wahadeł i ich długością; w tym celu sporządźmy sobie kilka wahadeł, których długości mają się do siebie, jak 1 do 4, do 9, do 16 i t. d. (fig. 14) i wprawmy je w ruch. Łatwo mo-

żemy się przekonać, że na wykonanie jednego wahnięcia, wahadło 4 razy dłuższe potrzebuje 2 razy większego czasu, 9 razy dłuższe—3 razy większego czasu, 16 razy dłuższe—4 razy większego czasu i t. d. niż wahadło, którego długość równa się 1. Mamy więc:

Długość wahadeł . . .	1	4	9	16	i t. d.
Czas wahnięć	1	2	3	4	i t. d.,

z czego wyprowadzamy drugie prawo wahadła: *czas wahnięć jest wprost proporcyonalny do pierwiastków kwadratowych z długości wahadeł.* Tak naprzykład w Warszawie wahadło, którego długość wynosi 0,9941 metr. wykonywa jedno wahnięcie dokładnie w ciągu 1 sekundy; chcąc otrzymać wahnięcia $^1/_2$ sekundowe, musimy wziąć wahadło 4 razy krótsze, a więc mające 0,2485 metr., dla 2-sekundowych wahnięć wahadło powinno mieć 4 razy większą długość—3,9764 m. i t. d.

Wahadło, odchylone od położenia pionowego, wraca doń napowrót, t. j. spada wskutek działania siły ciężkości, nadającej mu pewną prędkość; ta ostatnia zaś zależy od natężenia siły ciężkości, które mierzy się, jak już wiemy, prędkością, jakiej nabywa ciało, swobodnie spadające w próżni w końcu 1 sekundy, czyli przyśpieszeniem, oznaczanem zwykle przez g. Łatwo pojąć, że im większem jest natężenie siły ciężkości w danem miejscu, a więc im większem jest g, tem krótszego czasu wahadło potrzebuje do wykonania jednego wahnięcia. Rachunek pokazuje, że *czas wahnięcia jednego i tego samego wahadła jest odwrotnie proporcyonalny do pierwiastku kwadratowego z przyśpieszenia.* Gdyby naprzykład natężenie siły ciężkości zwiększyło się 4 razy, wtedy to samo wahadło kołysałoby się 2 razy prędzej, a więc jedno wahnięcie wykonywałoby w 2 razy krótszym czasie; przeciwnie: przy 4, 9 i t. d.-kroć zmniejszonem natężeniu ciężkości, wahadło kołysałoby się 2, 3 i t. d. razy wolniej, jedno więc wahnięcie trwałoby 2, 3 i t. d. razy dłużej.

Powyższe prawa ujęte są we wzór matematyczny, wyrażający zależność czasu wahnięcia od długości wahadła i od wielkości przyśpieszenia, dozwalający przeto obliczyć jednę z tych wielkości, jeżeli dwie pozostałe są znane. Wiedząc, jak wielkiem

jest przyśpieszenie w danem miejscu i znając długość wahadła, możemy na mocy tego wzoru obliczyć czas jednego wahnięcia, albo z góry powiedzieć, jak długiem powinno być wahadło, jeżeli przy danem przyśpieszeniu ma ono wykonywać jedno wahnięcie w danym czasie; nareszcie znając czas wahnięcia wahadła danej długości, możemy oznaczyć wielkość g dla danego miejsca. Wzór ten jest słusznym tylko dla wahadła matematycznego, doświadczenia więc, które urządzamy dla jego stwierdzenia, mogą dać rezultaty tylko przybliżone dlatego, że: 1) zawieszony ciężar nie jest pojedyńczym punktem, jak w wyobrażanem wahadle matematycznem, lecz zwykłe soczewką lub kulą, wyrobioną z jakiegoś metalu; 2) sam pręt lub nitka wahadła także posiada pewien ciężar; 3) opór powietrza, jako też tarcie w punkcie zawieszenia, nie dające się zupełnie uniknąć, coraz bardziej zwalniają kołysania. Jeżeli jednak użyjemy przyrządu, możliwie zbliżonego do wahadła matematycznego, to otrzymamy rezultaty na tyle zgodne z teoretycznie obliczonemi, że możemy je uważać za doświadczalne stwierdzenie praw wahadła.

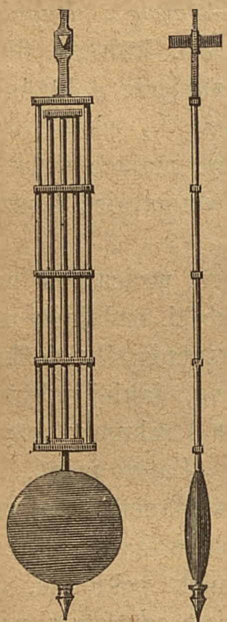


Fig. 15. Wahadło złożone, widziane od przodu i z boku.

Rozważmy teraz nieco bliżej budowę wahadła fizycznego czyli złożonego. Składa się ono po większej części z metalowej soczewki lub kuli, przymocowanej do dolnego końca pręta w ten sposób, ażeby oś jego przechodziła przez środek soczewki lub kuli; przez górną część pręta przechodzi trójgraniasty nóż, opierający się ostrą swą krawędzią na twardej polerowanej podstawie, zwykle z agatu lub stali; na ostrzu tem zawieszone jest całe wahadło, które dzięki temu urządzeniu, doznaje przy wahaniach nieznacznego tylko tarcia (fig. 15). Co jednak mamy uważać za długość takiego wahadła? W wahadle matematycznem czyli prostem, składającem się z jednego tylko ciężkiego punktu i nieważkiej nici, długością nazywamy odległość tego punktu od punktu zawieszenia;

od długości tej, jak wiemy już, zależy czas wahnięcia. Fizyczne natomiast wahadło składa się z nieskończenie wielu takich ciężkich punktów; gdyby każdy z nich stanowił oddzielne wahadło, wtedy kołysałyby się one z różną prędkością, mianowicie te, które leżą bliżej punktu zawieszenia, wahałyby się prędzej od tych, które są odeń bardziej oddalone. Że jednak wszystkie te ciężkie punkty są stale z sobą połączone w jednę całość, muszą więc one wszystkie wykonywać swe wahania w jednym i tym samym czasie, co możebnem jest tylko przez to, że punkty, bliższe punktu zawieszenia, ruch swój zwalniają, dalsze zaś przyśpieszają; wahania przeto każdego oddzielnego punktu zostają przyśpieszone pod wpływem punktów wyżej położonych, zwolnione zaś przez punkty niżej położone. Pomiędzy pierwszemi a ostatniemi musi istnieć taki punkt, dla którego przyśpieszenie ruchu i zwolnienie tegoż wzajemnie się znoszą i który tedy wykonywa swe wahania zupełnie w ten sam sposób, jak gdyby inne nie istniały, a on sam tylko tworzył matematyczne wahadło. Punkt ten nazywamy *środkiem wahań*, odległość zaś jego od punktu zawieszenia—*sprowadzoną długością wahadła fizycznego*. Czas wahnięcia wahadła fizycznego jest taki sam, jak wahadła matematycznego, mającego długość, równą długości sprowadzonej wahadła fizycznego, środek bowiem wahań wykonywa takie wahania, jak to wahadło matematyczne, inne zaś punkty, jako stale połączone ze środkiem wahań, muszą równocześnie z nim odbywać swe wahania. W wypadku, gdy pręt wahadła jest bardzo cienki, kula zaś—z bardzo ciężkiego materyału, naprzykład z platyny, środek wahań leży w środku kuli; w ogóle gdy kształt wahadła fizycznego jest prawidłowy, wtedy położenie tego punktu daje się oznaczyć drogą rachunku matematycznego. Możemy atoli środek wahań wahadła fizycznego dosyć dokładnie oznaczyć także na drodze doświadczalnej: w tym celu zawieszamy po za niem inne wahadło, możliwie zbliżone do matematycznego, w ten sposób, ażeby ich punkty zawieszenia leżały na jednej poziomej linii i staramy się temu ostatniemu nadać taką długość, aby wahało się ono zgodnie z tem, którego środek wahań chcemy znaleźć. Gdy po kilku próbach udaje się nam to uczynić, wtedy znaleziona długość naszego przy-

bliżenie matematycznego wahadła będzie zarazem szukaną długością sprowadzoną badanego wahadła fizycznego, środek zaś jego wahań leży w odległości, równej tej długości od punktu zawieszenia. Znając położenie środka wahań, a więc i długość sprowadzoną danego wahadła fizycznego oraz wielkość przyśpieszenia dla danego miejsca, możemy już na mocy wzoru obliczyć czas wahnięcia.

§ 2. Zastosowanie wahadła do regulowania zegarów.

W wiele lat po odkryciu zasadniczych praw wahadła przez Galileusza, znakomity uczony holenderski Huyghens, żyjący w drugiej połowie XVII wieku, wsławił się ważnemi pracami, tyczącemi się tego samego przedmiotu. On pierwszy pokazał, jak znaleźć środek wahań fizycznego wahadła i zastosowawszy je do regulowania biegu zegarów, umożliwił dopiero dokładne mierzenie czasu.

Zegary zwykle bywają poruszane przez ciężar, spadający pod wpływem ciężkości, — który za pomocą uwiązanej doń nici wprawia w ruch obrotowy walec wraz z nasadzonem nań kołem zębatem, — albo przez spiralnie zwiniętą sprężynę, która, stopniowo się rozkręcając, w podobny sposób porusza jakieś koło. Obracające się koła z kolei zahaczają o inne i ostatecznie przenoszą swój ruch na wskazówkę, posuwającą się po cyferblacie. Ażeby zegar odpowiadał celowi, ruch kół i wskazówki musi naturalnie być jednostajnym; wiemy jednak, że ciężar, według omówionych już w poprzednim rozdziale praw działania ciężkości, spada ruchem przyśpieszonym, to samo dotyczy zwiniętej sprężyny; koła więc zegara obracałyby się w obu wypadkach ze zmienną prędkością, gdybyśmy nie potrafili za pomocą stosownego urządzenia ujednostajnić ich ruchu; otóż rolę takiego regulatora w niektórych zegarach odgrywa wahadło, hamujące spadek ciężaru w sposób, przedstawiony na fig. 16 (str. 41).

Koło ze skośnemi zębami osadzone jest na osi, na którą nawinięty jest sznur z uwiązanym doń ciężarem P. Po nad kołem znajduje się t. z. hamulec A C B, mający kształt litery V, który zależnie

od swego położenia, z lewej albo z prawej strony zahacza o zęby koła, gdy kołyszące się wahadło porusza go to w jednę, to w drugą stronę. Figura 16 przedstawia wahadło właśnie w chwili, gdy zajmuje ono skrajne położenie z lewej strony. Koło zębate, obracające się pod działaniem spadającego ciężaru w kierunku strzałki, przy rzeczonem położeniu wahadła nie może się dalej poruszać dlatego, że ząb *a* zostaje wstrzymany przez hak A; gdy jednak wahadło, a wraz z niem hamulec zaczyna się wahać w przeciwną stronę, wtedy hak A wznosi się do góry, uwalniając przytem ząb *a* i koło znowu się obraca, dopóki opuszczający się hak B nie zatrzyma zęba *b* koła, co nastąpi wtedy, gdy wahadło zajmie skrajne położenie z prawej strony (wręcz przeciwne temu, jakie przedstawione jest na figurze). W następnej chwili wahadło znowu wraca ku lewej stronie, hak B teraz się podnosi, uwalniając ząb *b* i koło dalej się obraca, dopóki opuszczający się hak A nie zatrzyma następnego zęba *c*, co nastąpi w chwili, gdy wahadło powtórnie zajmie skrajne położenie z lewej strony. Przy każdem więc wahnięciu wahadła w jednę

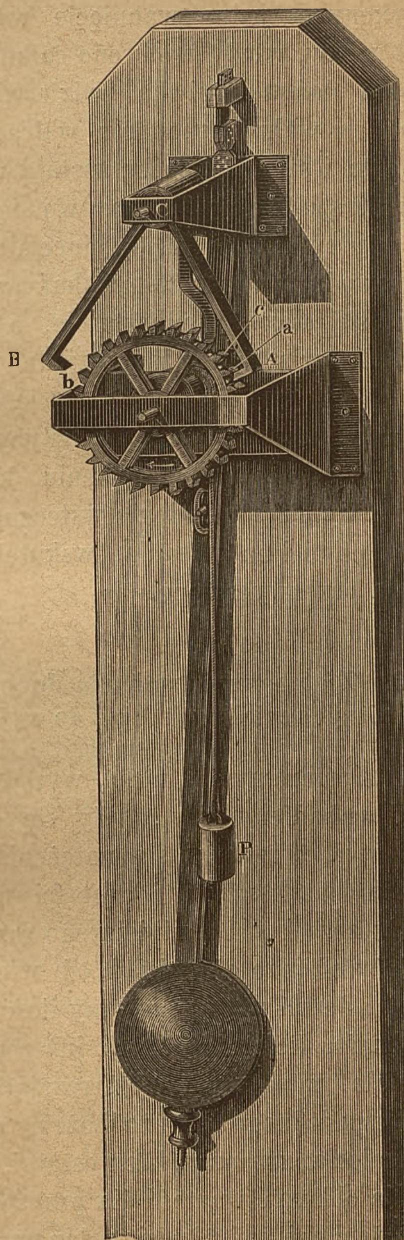


Fig. 16. Hamulec zegarowy.

i drugą stronę, koło posuwa się o jeden ząb. Jeżeli wahadło wykonywa jedno wahnięcie w ciągu 1 sek., a koło posiada 30 zębów, wtedy zrobi ono całkowity obrót w 1 minutę, przyczepiona doń wskazówka będzie więc pokazywała sekundy. Przy każdem wahnięciu, obrót walca, na którym osadzone jest koło zębate i spadek ciężaru zostają wstrzymane i po każdem wstrzymaniu spadek ciężaru nanowo się rozpoczyna, a że odstępy czasu pomiędzy dwoma następującemi po sobie przestankami są równe z powodu izochronizmu wahań wahadła, spadek więc ciężaru będzie się odbywał jednostajnie, o co właśnie tu chodzi. Hamulec przedstawia nadto jeszcze jednę korzyść: wahadło przy kołysaniach swych musi przezwyciężać różne przeszkody i dlatego wkrótce zatrzymałoby się, gdyby się kolysało samo jedno; przy powyższem jednak urządzeniu, koło zębate za każdem poruszeniem wywiera uderzenie wsteczne na jeden z haków hamulca, a przez to i na wahadło, wskutek czego przeszkody ruchu zostają przezwyciężone.

§ 3. Zastosowanie wahadła do oznaczenia natężenia siły ciężkości w różnych miejscach oraz do wykazania kształtu i gęstości ziemi.

Postaramy się teraz wytłómaczyć, w jaki sposób badania nad wahadłem przyczyniły się do rozwiązania wielu ważnych kwestyj, tyczących się natężenia siły ciężkości w różnych miejscach oraz kształtu i gęstości naszej planety. Jakeśmy to już wyłuszczyli w 1 § niniejszego rozdziału, czas wahnięcia wahadła zależy od jego długości i od wielkości miejscowego przyśpieszenia. Jeżeli więc policzymy ilość wahań, wykonywanych przez wahadło, którego długość już poprzednio dokładnie wymierzoną została, w pewnym wystarczająco znacznym czasie, naprzykład w ciągu jednego dnia, to możemy dokładnie oznaczyć czas jednego wahnięcia; znając zaś ten ostatni, łatwo już na mocy wzoru wahadła obliczyć wartość dla przyśpieszenia g, dającego nam miarę natężenia siły ciężkości w danem miejscu. W ten sposób otrzymano podaną już w poprzednim rozdziale wartość dla g w Paryżu, mianowicie 9,8094 metr. (taką prędkość miałoby, w na-

zwanem miejscu, ciało, spadające w próżni, w końcu 1-szej sekundy). Naodwrót z tej wartości długość wahadła sekundowego, t. j. takiego, które wykonywa jedno wahnięcie dokładnie w ciągu 1 sek.—dla Paryża oblicza się na 0,994 metra.

Wyobraźmy sobie teraz, że podróżnik posuwa się od równika ku biegunowi, wtedy w różnych punktach swej drogi będzie się on znajdował w niejednakowej odległości od środka ziemi, ta ostatnia bowiem nie jest dokładną kulą. Rzeczona odległość mianowicie jest największą na równiku, następnie maleje i na biegunie posiada wartość najmniejszą. Ponieważ ciążenie między dwiema masami zmniejsza się w stosunku odwrotnym do kwadratu z ich odległości, dla tego więc jednego już powodu natężenie siły ciężkości musi wzrastać od równika ku biegunowi. Do tego przyłącza się jeszcze druga okoliczność, mianowicie ruch obrotowy ziemi około osi, który przeciwdziała sile ciężkości i działanie jej po części znosi. Wskutek tego ruchu obrotowego ziemi, ciała, znajdujące się na jej powierzchni, starają się od niej oddalić, i to z tem większą siłą, im większą jest prędkość obrotowa danego punktu, czemu jednak przeszkadza przyciąganie, wywierane na nie przez ziemię. Dążność ta do oddalania się od ziemi jest największą na równiku—dlatego, że położone na nim punkty opisują przy obrocie ziemi największą drogę, a więc mają największą prędkość obrotową (i dla innego jeszcze względu, którego nie możemy tu wyłuszczyć), zmniejsza się w miarę tego, jak oddalamy się od równika ku jednemu z biegunów i na tych ostatnich staje się równą zeru. Działanie to możemy uwidocznić za pomocą przyrządu, przedstawionego na fig. 17. Lekkie obręcze metalowe, tworzące kulę,

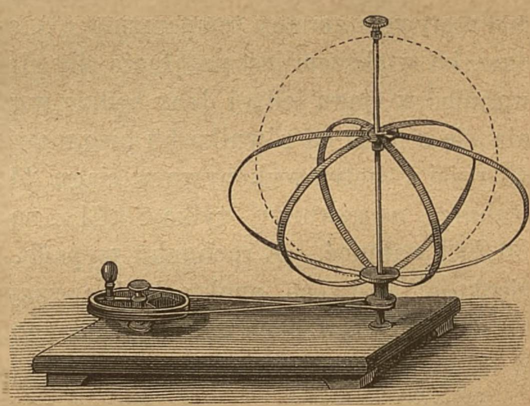


Fig. 17. Spłaszczenie obręczy wskutek ich ruchu obrotowego.

będąc wprawione w szybki ruch obrotowy, zostają spłaszczone na końcach osi i spłaszczenie jest tem znaczniejszem, im prędzej będziemy obracali korbę, a przez to i obręcze. Dla wymienionych dwóch przyczyn, natężenie siły ciężkości musi zmniejszać się od równika ku biegunom. Otóż do dokładnego mierzenia tych zmian służy wahadło, przyczem możemy postępować według jednej z dwóch następujących metod:

Przy pierwszej metodzie używa się wahadła o niezmiennej długości, którego pręt i soczewka stale są z sobą połączone, ostrze zaś, na którem ono spoczywa, nie daje się przesunąć. Wahadło takie, którego długość może się zwiększyć lub zmniejszyć tylko pod wpływem zmiany temperatury ([1]), będzie się wahało tem prędzej, im większem jest natężenie siły ciężkości, tak że liczba jego wahnięć w ciągu jednej doby będzie wzrastała, w miarę posuwania się z niem od równika ku biegunowi. Naprzykład, wahadło o długości 1 metra wykonywa w ciągu 24 godzin w Paryżu 86,137 wahnięć, na równiku —tylko 86,017, na biegunie zaś najwięcej— 86,242 wahnięć. Z rachunku wypada, że stosunek natężeń siły ciężkości w dwóch punktach obserwacyjnych równa się stosunkowi kwadratów liczb wahnięć jednego i tego samego wahadła w ciągu jednakowego czasu.

Przy drugiej metodzie w każdem oddzielnem miejscu wprawiamy w kołysania wahadło długości dowolnej, lecz dokładnie znanej. Liczba wahnięć, wykonanych przez dane wahadło w ciągu dostatecznie dużego czasu, podzielona przez liczbę sekund tegoż czasu, daje nam dokładną wartość czasu jednego wahnięcia, znając zaś ten, możemy na mocy wzoru obliczyć długość wahadła sekundowego. Z zestawienia wartości, otrzymanych w ten sposób dla wahadeł sekundowych w różnych miejscach, daje się obrachować stosunek natężeń ciężkości dla tych punktów.

([1]) O wpływie tym pomówimy w księdze o cieple, tutaj zaś nadmienimy tylko, że można urządzić takie wahadło, którego długość pozostaje stałą bez względu na temperaturę. Wahadło takie, zwane kompensacyjnem, przedstawione jest na fig. 15 (str. 38).

Zmniejszenie natężenia siły ciężkości na równiku po raz pierwszy było obserwowane za pomocą powyższego sposobu przez uczonego francuzkiego Richera podczas podróży, odbytej w r. 1671 z Paryża do Kajenny w Południowej Ameryce. Od tego czasu liczni pierwszorzędni badacze zajmowali się tym przedmiotem i z wielką ścisłością oznaczyli długość wahadła sekundowego, pośrednio więc i wielkość g dla różnych punktów na ziemi.

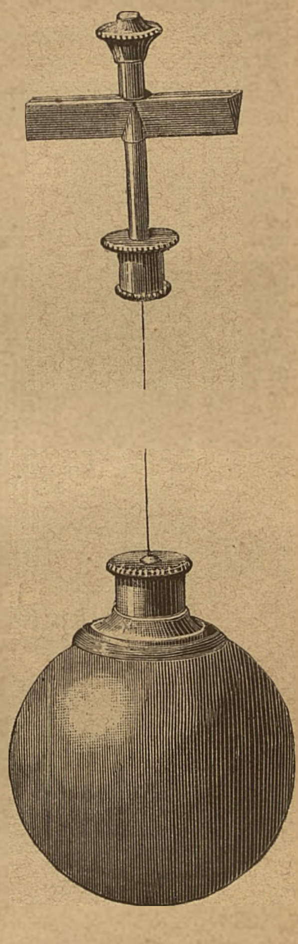


Fig. 18. Wahadło Bordy.

Podajemy tu opis wahadła, zbudowanego przez Bordę, którem uczony ten, zarówno jak i jego następcy Biot i Mathieu posługiwali się w swych badaniach, przedsięwziętych w Paryżu, Bordeaux i Dunkierce. Składało się ono (fig. 18) z kuli platynowej, o srednicy $36\frac{1}{2}$ milimetrów, przylepionej za pomocą cienkiej warstewki łoju do wklęsłej od dołu blaszki metalowej ([1]), wiszącej na bardzo mocnym, w całej swej długości jednakowo grubym drucie. Drut ten przymocowany był do małego walca, przez górną część którego przechodzi trójgraniasty nóż, opierający się dolną swą ostrą krawędzią na dwóch podstawkach z bardzo twardego kamienia, którym nadano położenie dokładnie poziome. Podstawki z kolei spoczywały na żelaznej podpórce, wmurowanej do ściany gmachu, oddalonego od ludnych ulic; w ten sposób zabezpieczono podstawki i wiszące na nich wahadło od wszelkich wstrząśnień.

([1]) Przy takiem urządzeniu można było kulę platynową zastąpić inną z odmiennego materyału, co dozwoliło stwierdzić, że czas wahnięcia jest niezależny od ciężaru i od materyału wahadła (patrz str. 36), jeżeli tylko przytem sprowadzona jego długość pozostaje niezmienioną.

Wahadło to zawieszono przed bardzo dokładnym zegarem, którego bieg został uregulowany według obserwacyj astronomicznych i który był zawieszony na ścianie w taki sposób, że nie pozostawał w żadnym związku z wahadłem platynowem. Nakoniec wahadło i zegar umieszczono w oszklonej szafce, dla uchronienia ich od ewentualnych ciągów powietrza (fig. 19).

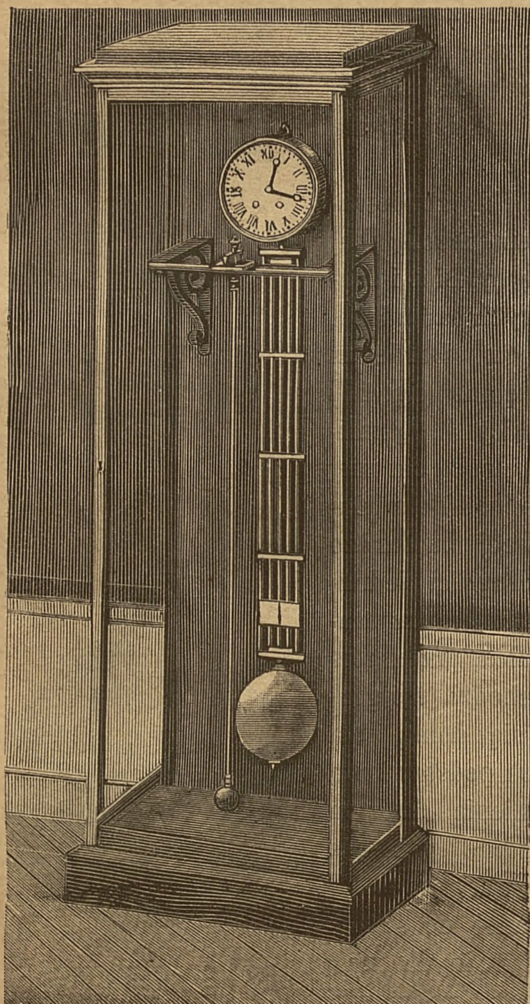


Fig. 19. Wahadło Bordy. Oznaczenie czasu wahnięcia za pomocą metody koincydencyj.

Dla możliwie dokładnego oznaczenia czasu wahnięcia wahadła platynowego, porównywa się jego wahania z kołysaniami wahadła zegarowego. W tym celu za pomocą lekkiego uderzenia wprawia się wahadło platynowe w kołysania i obserwuje te ostatnie, a zarazem i kołysania wahadła zegarowego, przez lunetę, ustawioną naprzeciw opisanego przyrządu w odległości mniej więcej 10 metr.

Patrząc przez lunetę na przyrząd, widzimy, jak wahadło zegarowe, na dolnej części którego poprzednio jeszcze nakreśliliśmy cienką linię pionową, i wahadło płatynowe oddzielnie prze-

chodzą przez pole widzenia. Ponieważ jedno wahadło zawsze nieco prędzej będzie się kołysało od drugiego—niechaj w naszym przykładzie czyni to wahadło platynowe — to po pewnej liczbie wahań oba jednocześnie wejdą w pole widzenia i w środku jego się pokryją, a wtedy zobaczymy tylko drut wahadła platynowego, ten bowiem zasłoni znajdującą się po za nim kreskę wahadła zegarowego. Moment ten nazywamy koincydencyą (zlewaniem się) i obieramy go za punkt wyjścia dla naszych obserwacyj. Dla lepszego uchwycenia tego momentu, rozpoczynamy spostrzeżenia nieco wcześniej, widzimy wtedy, jak jedno wahadło coraz więcej dogania drugie, aż nareszcie oba dokładnie jednocześnie przechodzą przez środek pola widzenia i otrzymujemy pierwszą koincydencyę. Przy następnych kołysaniach, wahadło platynowe będzie coraz bardziej wyprzedzało zegarowe, tak, że po pewnym czasie pierwsze już wraca, podczas gdy drugie jeszcze naprzód się kołysze i po pewnym czasie wracające wahadło platynowe pokryje w środku pola wahania naprzód jeszcze idące wahadło zegarowe; do tego punktu wahadło platynowe zrobiło więc, licząc od poprzedniej koincydencyi, obranej za punkt wyjścia, o jedno wahnięcie więcej od zegarowego. Dalej wahadło platynowe coraz bardziej wyprzedza zegarowe, po pewnym czasie kołysze się z niem już w jednym kierunku i nareszcie poruszając się w tę samą stronę, znowu jednocześnie z niem przechodzi przez środek pola widzenia, zupełnie tak samo, jak przy pierwszem spostrzeżeniu. Przy tej drugiej koincydencyi, wahadło platynowe wykonało o 2 wahnięcia więcej, niż zegarowe (zawsze licząc od obranego punktu wyjścia) i tak przy każdej następnej koincydencyi zrobi ono o jedno wahnięcie więcej. Przypuśćmy, że wahadło zegarowe wykonywa jedno wahnięcie dokładnie w ciągu 1 sekundy i że do chwili, gdyśmy zaobserwowali 10 koincydencyj, wskazówka zegaru posunęła się o 50 sek., wtedy wahadło platynowe oczywiście wykonało 60 wahnięć, czas więc jednego wahnięcia równa się $^{50}/_{60}$ czyli $^{5}/_{6}$ sekundy. W ogóle czas wahnięcia badanego wahadła będzie się równał ilorazowi z liczby sekund, upłynionych od początku obserwacyi, przez sumę z liczby sekund i z liczby koincydencyj. Metoda ta, nosząca nazwę metody

koincydencyj, dozwala oznaczyć czas wahnięcia z bardzo wielką dokładnością.

Poniższa tabliczka pokazuje długość wahadła sekundowego i wielkość przyśpieszenia g dla różnych szerokości geograficznych:

	długość wah. sek.	g.
dla szerok. 0° (na równiku) . . .	0,99103 metra	9,78103 metr.
„ 45°	0,99352 „ .	9,80606 „
„ 52°, 13′,6″ (Warszawa)	0,9941 „ .	9,81195 „
„ 90° . . (na biegunach)	0,99619 „ .	9,83109 „

Jakeśmy to już powyżej wyłuszczyli, zmienność natężenia siły ciężkości w różnych miejscach na ziemi zależy od dwóch przyczyn: 1) od tego, że ziemia nasza nie jest dokładną kulą, lecz nieco spłaszczoną na biegunach; 2) od tego, że, wskutek jej ruchu obrotowego około osi, różne punkty, znajdujące się na powierzchni ziemi, mają dążność do oddalania się od jej środka. Otóż zbadano, jak wielkim jest udział każdej z tych przyczyn. Obliczono, że gdyby ziemia była dokładną kulą, wtedy wskutek samego tylko jej ruchu obrotowego natężenie ciężkości na równiku byłoby o $^1/_{289}$ mniejszem, niż na biegunach. (Rachunek pokazuje także, że gdyby ziemia obracała się 17 razy prędzej niż obecnie, wtedy ciała, znajdujące się na równiku nie posiadałyby żadnego ciężaru, a więc pozostawione samym sobie w powietrzu, nie spadałyby na ziemię). Z drugiej strony pomiary geodetyczne wykazały, że odległość punktu, leżącego na równiku od środka ziemi (średni promień równikowy) jest o 3 mile większą niż takaż odległość punktu, położonego na jednym z biegunów (promień biegunowy). Ze ścisłych obliczeń wypada, że wskutek obu wymienionych przyczyn natężenie ciężkości jest na biegunach o $^1/_{200}$ większem, niż na równiku. Znając wpływ ruchu obrotowego ziemi, można już było z badań nad wahadłem obliczyć jej spłaszczenie, wyrażające się stosunkiem różnicy promienia równikowego i biegunowego do promienia równikowego. Spłaszczenie to według pomiarów geodetycznych wynosi $^1/_{299}$, z badań nad wahadłem wypada dlań wartość $^1/_{292}$, a więc bardzo blizko się zgadzająca z poprzednią.

Przy porównaniu wahań wahadła w różnych okolicach na ziemi, odkryto zadziwiający fakt, że w niektórych miejscach wskazują one natężenie ciężkości większe od tego, jakie wypada według rachunku z ich szerokości geograficznej, w innych natomiast— mniejsze. Ponieważ wypadki pierwszego rodzaju zaobserwowano głównie na wyspach, leżących na pełnem morzu, w bardzo znacznej odległości od lądu, drugiego zaś przeciwnie—na wybrzeżach lub w środku kontynentów, niektórzy wyciągnęli z tego wniosek, że „powierzchnia wód na środku oceanów bardziej się obniża, tak że jest ona tam bliższą środka ziemi, w blizkości lądów zaś przeciwnie podnosi się do znacznej wysokości i przeto więcej jest oddaloną od środka ziemi, niż należałoby wnosić ze znalezionego spłaszczenia ziemi" ([1]). Wahadło wykazywałoby tedy nawet nierówności w krzywiznie kuli ziemskiej.

Z porównania długości wahadeł sekundowych dla dwu punktów, leżących pod tą samą szerokością geograficzną, z których atoli jeden znajduje się na szczycie wysokiej góry, drugi zaś— na wysokości poziomu morza, daje się obliczyć gęstość ziemi, t. j. daje się oznaczyć, ile razy większą jest masa ziemi w porównaniu do masy równej objętości wody. Do tego samego rezultatu można dojść przez porównanie wahań wahadła na powierzchni ziemi i w pewnej głębokości jej wnętrza, a to na zasadzie twierdzenia, według którego stosunek natężeń ciężkości w punkcie na powierzchni ziemi i w pewnym punkcie jej wnętrza zależy od stosunku odległości tych punktów od środka ziemi i od stosunku gęstości warstwy zewnętrznej i jądra wewnętrznego; stosunek natężeń ciężkości oblicza się z wahań wahadeł, pomieszczonych w tych punktach. Opierając się na rzeczonem twierdzeniu, Airy, obecny dyrektor obserwatoryum astronomicznego w Greenwich, wprawiał w kołysania dwa wahadła, z których jedno pomieścił na powierzchni ziemi u wejścia do szybu kopalni w Harton, drugie zaś—na dnie jego w głębokości 384 metrów. Za każdem wahadłem znajdował się, podobnie jak w powyżej opisanych doświadczeniach Bordy, dokładny zegar, według którego oznaczano

([1]) Saigey, „Fizyka ziemi".

czas wahnięcia za pomocą metody koincydencyj. Obserwacye, w ten sposób dokonane, pokazały, że przyśpieszenie na dnie tego szybu jest o $^{1}/_{19190}$ większem, niż na powierzchni. Z tego rezultatu wynika, że gęstość warstw kuli ziemskiej wzrasta od powierzchni ku jej środkowi, w przeciwnym bowiem razie natężenie ciężkości musiałoby się ku wnętrzu ziemi zmniejszać, czemu przeczy obserwacya. Na podstawie znanego składu gruntu naokoło kopalni, oznaczono średnią gęstość warstwy zewnętrznej—mającej w tym wypadku grubość, równą głębokości szybu, a więc 384 metr.—w pobliżu szybu na 2,5. Airy przyjął, że taką samą jest średnia gęstość zewnętrznej warstwy (rzeczonej grubości) całej kuli ziemskiej, co można uczynić bez popełnienia znacznego błędu,—chociaż warstwa ta nie jest naturalnie wszędzie jednorodną—dlatego, że na wielkość natężenia ciężkości w danem miejscu mają przeważnie wpływ tylko masy, znajdujące się w najbliższem jego otoczeniu. Ze znanych odległości punktów u wejścia i na dnie szybu od środka ziemi i z powyżej podanej gęstości zewnętrznej warstwy, oblicza się gęstość wewnętrznego jądra (to jest całej kuli ziemskiej bez zewnętrznej warstwy grubości 384 metr.) na 6,5; a ponieważ w obec masy tego ostatniego, masa warstwy zewnętrznej jest nic nieznaczącą, można przeto przyjąć, że średnia gęstość całej kuli ziemskiej jest przybliżenie 6,5 razy większą, niż wody. Poprzednicy Airy'ego—Cavendish, Maskelyne, Hutton i Reich, którzy starali się rozwiązać tę samą kwestyę za pomocą innych metod, znaleźli średnią gęstość ziemi równą tylko mniej więcej 5,5—rezultat, jak widzimy, dosyć znacznie się różniący od poprzedniego, co jednak, w obec trudności samego zadania, nie powinno nas dziwić. W każdym razie, na podstawie wszystkich tych wyników, mamy prawo wnosić, że wnętrze ziemi składa się z materyi daleko gęstszej, niż zbadana dotychczas skorupa ziemska.

§ 4. Zastosowanie wahadła do wykazania ruchu obrotowego ziemi około osi. Doświadczenia Foucault'a.

Zawieśmy na haczyku *b* giętką nitkę z uwiązaną do niej ciężką kulką i wprawmy wahadło w kołysania tak, ażeby te odbywały się w jakiejkolwiek określonej płaszczyznie, dajmy na to w płaszczyznie ramki (fig. 20). Jeżeli teraz cały przyrząd osadzimy wydrążeniem *a* na osi t. z. maszyny odśrodkowej, wskazanej na fig. 17 i będziemy go obracali z dowolną prędkością, to przy dostatecznie delikatnem zawieszeniu w *b*, wahadło będzie się jednak wciąż kołysało w tej samej absolutnej płaszczyznie, ukazując swym ruchem stale jednę stronę pokoju. Przy każdym pół-obrocie przyrządu, wszystkie średnice koła, nakreślonego na stoliku po kolei przejdą pod kulką wahadła i podczas gdy płaszczyzna ramki będzie się odchylała na coraz to większy kąt od płaszczyzny wahań, ta ostatnia zachowa pierwotne swe położenie w przestrzeni (a więc pozornie będzie się odchylała od płaszczyzny ramki w kierunku, przeciwnym kierunkowi obrotu). Z doświadczenia tego przekonywamy się, że płaszczyzna wahań wahadła pozostaje stałą, pomimo że punkt jego zawieszenia się obraca.

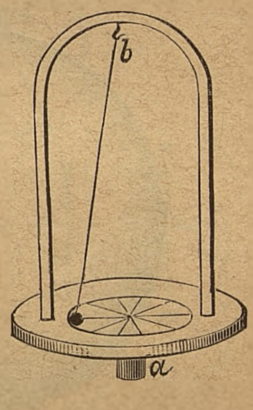


Fig. 20. Stałość płaszczyzny wahań wahadła.

Wyobraźmy sobie teraz, że znajdujemy się na biegunie *p* (fig. 21, *str.* 52) i przypuśćmy, że zawieszone tam wahadło, które w stanie spoczynku zajmuje położenie, stanowiące przedłużenie osi ziemi $pp_{,,}$ wprawione w ruch wykonywa kołysania wzdłuż jednej ze średnic znajdującego się pod niem koła, podzielonego na stopnie, naprzykład wzdłuż średnicy *b c*. Ponieważ ziemia się obraca z zachodu na wschód i robi całkowity obrót w ciągu 24 godzin, linia *b c* po upływie 1 godziny posunie się o 15^0 na wschód od pierwotnego swego położenia, wahadło jednak, zacho-

wując stale płaszczyznę wahań, kołysać się będzie w tym samym co i poprzednio kierunku; skoro jednak ruchu ziemi dostrzedz nie moglibyśmy, przeto wydawałoby się nam, że nie linia *b c* odstąpiła o 15⁰ na wschód, lecz przeciwnie, że płaszczyzna wahań posunęła się o tyleż stopni w kierunku odwrotnym, t. j. od wschodu na zachód, czyli w kierunku pozornego ruchu słońca. Po 2 godzinach płaszczyzna wahań pozornie odchyli się od linii *b c* o 30^0 na zachód, po 6 godzinach stanowić będzie z linią *b c* kąt prosty, po 12 godzinach wahadło znowu kołysać się będzie wzdłuż linii *b c* i t. d. i po upływie całej doby płaszczyzna wahań pozornie wykona jeden całkowity obrót, w każdej chwili zlewając się z płaszczyzną innego południka.

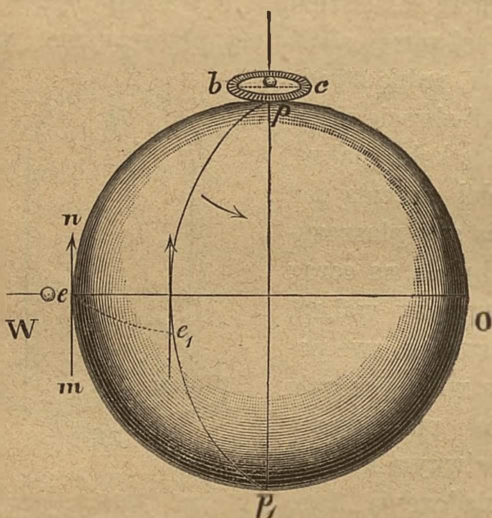


Fig. 21. Wahadło na biegunie i na równiku.

Rzecz się zmieni, jeżeli wahadło zawiesimy na równiku, w punkcie *e* (fig. 21). Niechaj wahadło kołysze się naprzykład wzdłuż linii południkowej *m n* — stycznej do koła południkowego *p e p₁*, w punkcie *e*; po pewnym czasie, wskutek obrotu ziemi, punkt *e*, a wraz z nim wahadło i linia południkowa przejdzie do punktu *e₁*, leżącego na wschód od *e*, przytem linia *m n* przyjmie położenie równoległe do pierwszego, a że płaszczyzna wahań pozostaje stałą, przeto i w punkcie *e₁* wahadło będzie się kołysało wzdłuż linii południkowej. Tak samo rzecz się będzie miała, jeżeli wahania będą się odbywały w jakiejkolwiek innej płaszczyźnie. Na równiku więc płaszczyzna wahań wahadła nie odchyla się wcale od pierwotnego swego położenia, obrót ziemi nie powoduje tam żadnego pozornego obrotu tej płaszczyzny.

Nieco zawilszemi stają się stosunki, gdy wahadło znajduje się w jakiejś średniej szerokości geograficznej pomiędzy równikiem a biegunem, naprzykład w punkcie *A* (fig. 22). Niechaj kołysania wahadła znowu odbywają się wzdłuż linii południkowej *m n*, która leży w płaszczyznie koła południkowego *p e p,,* przedłużenie jej przetnie więc przedłużenie osi ziemi *p p,* w punkcie *o*. Gdy wskutek obrotu ziemi, punkt *A* przejdzie do *A,,* wtedy linia południkowa przyjmie położenie *m, n,,* które z poprzedniem stanowi kąt *A o A,,* wahadło natomiast, zachowując stale płaszczyznę wahań, będzie się kołysało wzdłuż linii *a b*, równoległej do *m n* i tworzącej teraz z linią południkową *m, n,* kąt *a A, m,*. równy kątowi *A o A,*. Ponieważ jednak nie możemy zauważyć istotnego odchylenia (od zachodu na wschód) linii południkowej od płaszczyzny wahań wahadła, będzie się nam więc wydawało, że ta ostatnia odchyliła się od linii południkowej o kąt *A o A,* w kierunku przeciwnym, to jest od wschodu na zachód, czyli w kierunku pozornego ruchu słońca. Kąt *A o A,* (kąt pozornego obrotu płaszczyzny wahań) jest mniejszym od kąta *A B A,* (kąta istotnego obrotu ziemi) i to tem mniejszym, im bliżej równika leży punkt *A*. Podczas więc gdy ziemia robi całkowity obrót, płaszczyzna wahań wahadła, pomieszczonego w jakimkolwiekbądź punkcie między równikiem i biegunem, wykonywa tylko część obrotu, do całkowitego przeto obrotu potrzebuje ona dłuższego czasu niż 24 godzin i to tem dłuższego, im mniejszą jest szerokość geograficzna danego punktu. Znając tę ostatnią, można obliczyć, w jakim czasie płaszczyzna wahań wahadła wykonywa całkowity pozorny obrót, tak naprz. dla Warszawy, leżącej pod 52°, 13′, 5″ sz. geogr., czas ten wynosi przeszło 1 3/5 doby.

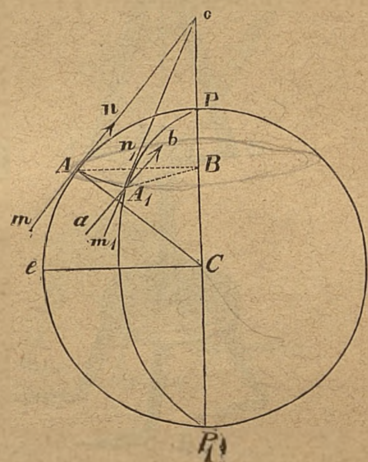


Fig. 22. Wahadło między równikiem i biegunem.

Opisane zjawiska staną się dla czytelnika, być może, zrozumialszemi po rozważeniu poniższych doświadczeń z bardzo prostym przyrządem, składającym się z ramki *a b c* (fig. 23), do której przymocowuje się giętki pręt stalowy, zakończony kulką *d*. Ramkę możemy za pomocą szrubki *M* przymocować w jakiemkolwiek położeniu do osi *MN*, około której daje się ona obracać. Jeżeli ramka zajmuje położenie, wskazane na fig. 23, wtedy pręt *c d* stanowi przedłużenie osi *MN*; niechaj ta ostatnia wyobraża oś ziemi, wtedy cały przyrząd przedstawia wahadło, zawieszone na

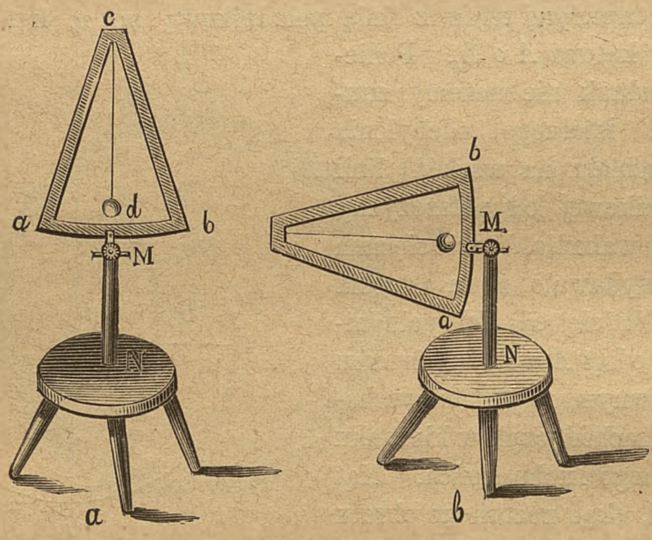


Fig. 23 i 24. Przyrząd ilustrujący pozorne odchylenie płaszczyzny wahań na biegunie (23), na równiku (24).

biegunie. Odchylmy kulkę *d* w kierunku *a* i pozostawmy ją samej sobie; wskutek sprężystości pręta będzie się ona wahała tam i napowrót w płaszczyźnie ramki wzdłuż dolnej krawędzi *a b*, ukazując swym ruchem stale jednę stronę pokoju. Jeżeli teraz będziemy obracali ramkę, to zobaczymy, że płaszczyzna wahań będzie tworzyła z płaszczyzną ramki coraz to większy kąt i kiedy ramka wykona całkowity obrót, płaszczyzna wahań zrobi takiż pozorny obrót w kierunku przeciwnym.

Nadajmy teraz ramce położenie prostopadle do osi (fig. 24), wtedy przyrząd nasz przedstawia wahadło, zawieszone na równiku. Wprawiwszy kulkę w kołysania znowu wzdłuż krawędzi *a b* i obracając ramkę, przekonamy się, że w tym razie nie następuje żadne odchylenie płaszczyzny wahań, t. j. kulka wcale nie wyjdzie z płaszczyzny ramki, pomimo obrotu przyrządu. Nareszcie przy mniejszem, niż w poprzednim wypadku, nachyleniu ramki względem osi *MN*, (fig. 25) przyrząd będzie przedstawiał wahadło, znajdujące się między równikiem i biegunem. Obracając ramkę, zobaczymy, że płaszczyzna tej ostatniej odchyla się od płaszczyzny wahań kulki, podobnie jak przy pionowem ustawieniu ramki, z tą jednak różnicą, że kąt odchylenia będzie teraz mniejszy niż w pierwszym wypadku, tak że gdy ramka wykona całkowity obrót, płaszczyzna wahań nie zrobi jeszcze całkowitego pozornego obrotu, nastąpi to dopiero później, i to tem później, im bardziej nachyloną jest ramka względem osi.

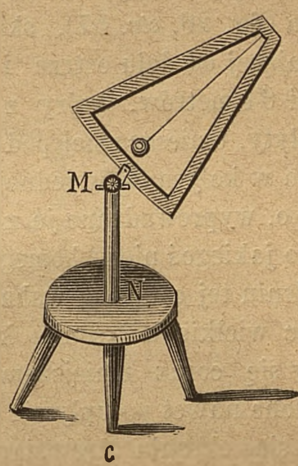


Fig. 25. Przyrząd ilustrujący pozorne odchylenie płaszczyzny wahań między równikiem i biegunem.

Gdybyśmy w powyższych doświadczeniach zawiesili kulkę nie na pręcie, lecz na nitce, wtedy ta ostatnia, przyjąwszy przy nachylonem położeniu ramki (fig. 24 i 25) kierunek pionowy, wyszłaby z ramki i nie moglibyśmy za pomocą opisanego przyrządu pokazać pozornego odchylenia płaszczyzny wahań. Natomiast pręt stalowy nie będzie się zwieszał pionowo, gdy ramka jest nachyloną względem osi; niemniej jednak stanowi on wahadło, chociaż kołysania jego zachodzą tu nie wskutek działania ciężkości, lecz wskutek sprężystości pręta.

Pozorne odchylenie płaszczyzny wahań wahadła po raz pierwszy było obserwowane w r. 1851 przez znakomitego fizyka

francuzkiego Foucault'a, który wykazał także, że zjawisko to zależy od ruchu obrotowego ziemi około osi. Doświadczenia, wykonywane przezeń z początku w obserwatoryum paryzkiem, później zaś w Panteonie—przed bardzo liczną publicznością, ściągnęły na siebie uwagę całego świata naukowego i były następnie wielokrotnie powtarzane w różnych miejscach, wydając wszędzie ten sam rezultat. Chcąc dobrze uwidocznić odchylenie płaszczyzny wahań, należy użyć bardzo długiego wahadła, które raz wprawione w ruch, długo zachowywałoby swe kołysania, i delikatnie je zawiesić tak, ażeby mogło swobodnie się wahać w każdej pionowej płaszczyznie. Foucault do doświadczeń swych użył wahadła (fig. 26, *str*. 57), składającego się z ciężkiej mosiężnej kuli, mającej od dołu ostrze i przyczepionej do stalowego pręta długości 64 metrów, który z kolei przytwierdzony był do metalowej płyty, umieszczonej pod kopułą Panteonu. Ażeby wprawić wahadło w kołysania w jednej płaszczyznie i nie nadać mu ruchu bocznego, wyprowadzano je z pionowego położenia i przywiązywano do jakiegoś nieruchomego przedmiotu za pomocą nitki; po przepaleniu tej ostatniej wahadło rozpoczynało swój ruch, wykonywając wielkie kołysania, które, jakkolwiek z biegiem czasu stawały się coraz mniejszemi, z łatwością jednak mogły być zauważone nawet po upływie całej doby. Naokoło wahadła znajdowała się okrągła drewniana galerya, podzielona na stopnie i posypana piaskiem, na którym ostrze kuli za każdem wahnięciem kreśliło linię; posuwanie się tej linii od wschodu na zachód wskazywało pozorne odchylanie się płaszczyzny wahań. Ze znanej szerokości geogr. dla Paryża można było obliczyć, na jaki kąt powinna się pozornie odchylić płaszczyzna wahań w ciągu określonego czasu, jeżeli ziemia obraca się około osi w 24 godzin; otrzymane w praktyce rezultaty dobrze się zgadzały z teoretycznie obliczonemi. Podobne doświadczenia, przedsięwzięte w innych miastach, wszędzie doprowadziły do wyników, zgodnych z teoryą tak, że mogą one być uważane za niezbity doświadczalny dowód ruchu obrotowego ziemi około osi.

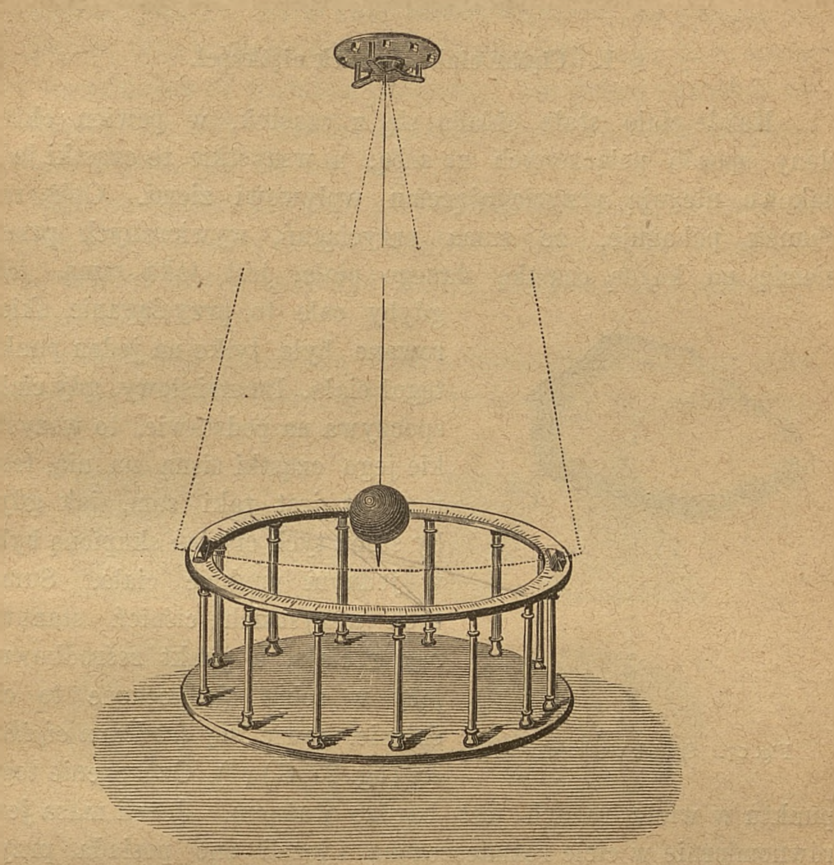


Fig. 26. Doświadczenie Foucault'a, wykonane w panteonie paryzkim w r. 1851.

Wahadło znalazło, oprócz wymienionych, jeszcze liczne inne zastosowania, jak naprzykład do mierzenia taktu przy wykonywaniu utworów muzycznych (metronom), do mierzenia bardzo wielkich prędkości (wahadło balistyczne) i t. d. Że jednak opisowi tego ważnego przyrządu i tak już poświęciliśmy więcej miejsca, niż na to pozwala zakres niniejszego dzieła, musimy przeto czytelnika co do bliższych szczegółów wzmiankowanych zastosowań odesłać do obszerniejszych podręczników fizyki.

ROZDZIAŁ IV.

§ 1. Ciężar ciał. Środek ciężkości.

Każde ciało stałe składa się z cząstek, w pewien określony sposób połączonych ze sobą, a wszystkie te cząstki jednakowo ulegają przyciągającemu wpływowi ziemi. Otóż rachunek pokazuje, że suma przyciągań, wywieranych przez ziemię na każdą cząstkę danego ciała, jest taką samą, jak gdyby całe to przyciąganie skierowane było tylko na jeden punkt tegoż ciała. Innemi słowy, gdy ciało spoczywa na podstawie, to wszystkie jego cząstki cisną na nią, lecz rezultat jest taki sam, jak gdyby suma tych ciśnień skupioną była w jednym punkcie ciała. Suma tych wszystkich ciśnień stanowi *ciężar* ciała, a punktześrodkowujący w sobie zjednoczone to ciśnienie, zowie się *środkiem ciężkości* (fig. 27 G) ([1]). Oznaczenie tego punktu w wielu razach jest bardzo ważnem. Jeżeli masa jest równomiernie w ciele rozmieszczoną i jeżeli ono posiada przytem kształt zupełnie prawidłowy, środek ciężkości łatwo daje się oznaczyć geometrycznie, jak pokazują następujące przykłady.

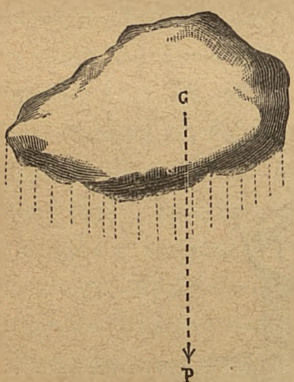


Fig. 27. Środek ciężkości.

Środek ciężkości linii prostej znajduje się na połowie jej długości; w kwadracie, w prostokącie lub w ogóle w równoległoboku środek ten leży w punkcie przecięcia dwóch przekątnych (fig. 28, *str.* 59); w trójkącie znajduje się on w punkcie przecięcia linij, łączących wierzchołek ze środkiem przeciwległego boku; w krążku, w pierścieniu lub w elipsie leży on w ich środku.

([1]) We wszystkich poniższych figurach punkt, w którym znajduje się środek ciężkości, oznaczamy przez literę *G*.

Prawidłowe pryzmaty, oraz równoległościany, a także proste i skośne cylindry mają swój środek ciężkości na połowie osi (fig. 29, *str.* 60); w piramidzie zaś i stożku leży on na linii, która łączy wierzchołek ze środkiem podstawy, na jednej czwartej od tej ostatniej (fig. 29). Środek ciężkości kuli i elipsoidu znajduje się w ich centrze (fig. 30, *str.* 61).

Najczęściej wszakże ciało nie posiada zupełnie prawidłowego kształtu, albo też masa nie jest w niem równomiernie rozmieszczoną, wtedy można oznaczyć środek ciężkości za pomocą doświadczenia.

Z powyższego określenia środka ciężkości wynika, że ciało znajduje się w równowadze, gdy ów środek leży na jednej pionowej z punktem podparcia lub zawieszenia. Zawieśmy ciało na sznurze i poczekajmy, aż przyjmie on kierunek pionowy i nastąpi równowaga; wtedy wiemy, że środek ciężkości leży na przedłużeniu sznura (fig. 31, *str.* 61); następnie przymocujmy sznur w innym punkcie ciała i powtórzmy doświadczenie, a otrzymamy drugie przedłużenie, na którym leży środek ciężkości. A więc ten ostatni znajduje się jednocześnie na obu przedłużeniach, czyli w punkcie ich wzajemnego przecięcia (fig. 31 *G*). Metoda ta z łatwością daje się zastosować do określania środka ciężkości ciał płaskich; przy innych zaś ciałach trudno jest niekiedy oznaczyć dokładnie przedłużenie kierunku pionowego do ich wnętrza.

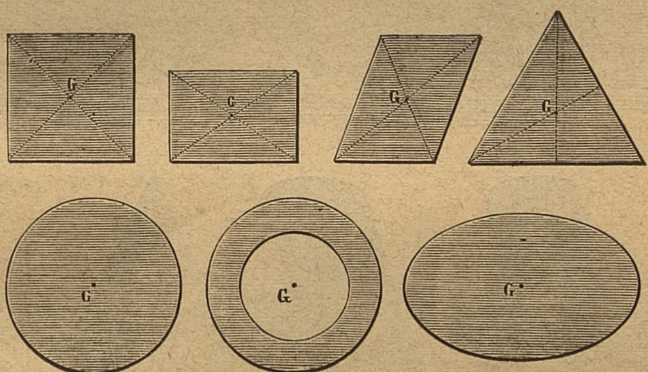


Fig. 28. Srodek ciężkości kilku figur płaskich.

Powiedzieliśmy już, że warunkiem równowagi ciał jest, ażeby środek ich ciężkości leżał na jednej pionowej z punktem zawieszenia lub podparcia. Rozważmy tedy najprzód ciała zawieszone w punkcie, około którego mogą swobodnie się obracać. Jeżeli ciało jest zawieszone w samym środku ciężkości (fig. 32, *str.* 62, krążek środkowy), wtedy znajduje się ono zawsze w stanie równowagi niezależnie od położenia, jakie zajmuje, w każdym bowiem razie środek ciężkości i punkt zawieszenia wypadają na

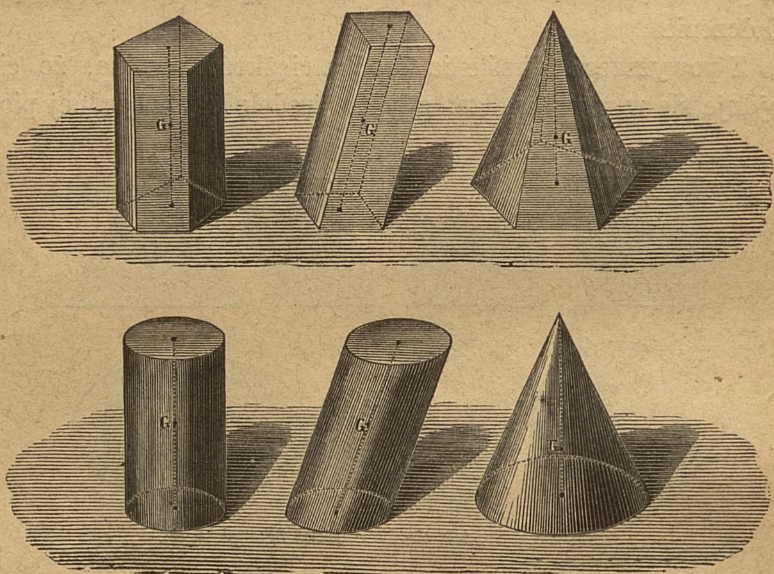


Fig. 29. Środek ciężkości kilku ciał bryłowatych.

jednej pionowej. Taka równowaga zowie się *obojętną*. Ciałom, mającym obracać się jednostajnie około swych osi, jak np. kołom rozpędowym w maszynach, staramy się zawsze nadać równowagę możliwie obojętną. Jeżeli środek ciężkości leży poniżej punktu zawieszenia (fig. 32, krążek prawy), to przy wyprowadzeniu ciała z równowagi, środek ten wznosi się do góry, a ponieważ siła ciężkości ustawicznie dąży do jego obniżania, przeto sprowadza go ona w końcu do pierwotnego położenia i równowaga zostaje przywróconą. Taka równowaga zowie się *stałą*, a jako przykład może tu służyć wahadło.

Nakoniec jeżeli środek ciężkości leży powyżej punktu zawieszenia (fig. 32, krążek lewy), to przy najlżejszem odchyleniu ciała z położenia równowagi, środek ten zostaje obniżonym, a siła ciężkości, obniżając go coraz bardziej, oddala go od pierwotnego położenia równowagi i ciało nie prędzej przechodzi w stan spoczynku, aż środek ciężkości nie znajdzie się poniżej punktu zawieszenia. Taką równowagę nazywamy *niestałą*.

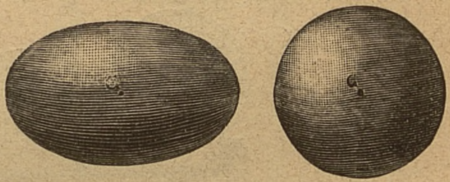


Fig. 30. Srodek ciężkości elipsoidu i kuli.

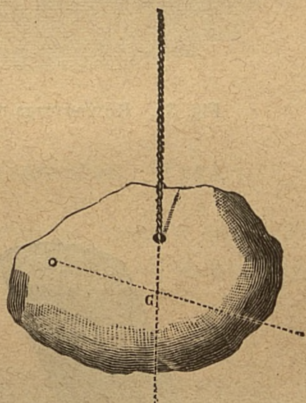


Fig. 31. Określenie środka ciężkości ciała, mającego nieprawidłowy kształt.

Zwróćmy się obecnie do ciał podpartych. Gdy mniejsza lub większa część powierzchni ciała opartą jest o podstawę, wtedy dla równowagi jego wystarcza, jeżeli p i o n o w a, opuszczona ze środka ciężkości, pada wewnątrz podparcia. Skośny cylinder lub ciało owalne, postawione tak, jak pokazuje figura 33 (*strona* 62), znajdują się w stanie równowagi; gdyby zaś, wskutek ich nachylenia, p i o nowa, opuszczona ze środka ciężkości, wypadła po za punktami podpartemi, ciała te przewróciłyby się. Fig. 34 (*str*. 63) przedstawia równowagę ciała p o d p a r t e g o w trzech punktach; i tutaj także widzimy, że owa linia pionowa pada wewnątrz figury podparcia. Również i wieża w Pizie, rysunek której przedstawiony jest na tablicy I, jakkolwiek mocno nachylona, utrzymuje się w równowadze, gdyż pionowa, opuszczona ze środka ciężkości całej budowy, spotyka ziemię wewnątrz podstawy wieży. Nosiwoda pochyla się na prawo, tragarz zaś ku przodowi w tym celu (fig. 35, *str*. 63), ażeby pionowa ze wspólnego środka ciężkości ich własnego ciała i noszonego cię-

żaru, padała wewnątrz figury podparcia, opisanej przez ich nogi. Wóz, jadący po bardzo pochyłej drodze, (fig. 36, *str.* 64) znajduje się w równowadze, dopóki środek ciężkości leży nad czworobokiem, utworzonym przez połączenie czterech kół; gdy droga staje się zbyt pochyłą, albo wstrząśnienia podczas jazdy tak silnemi, że ów środek wypada po za granicami czworoboku, wtedy wóz przewraca się.

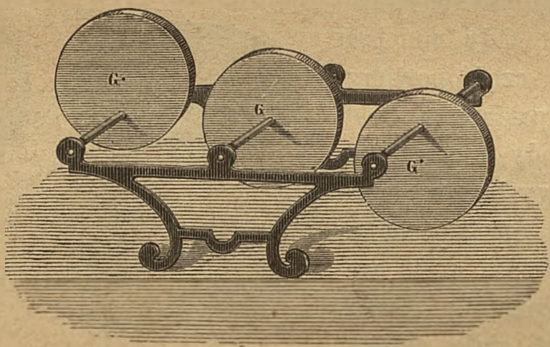


Fig. 32. Równowaga niestała, obojętna i stała.

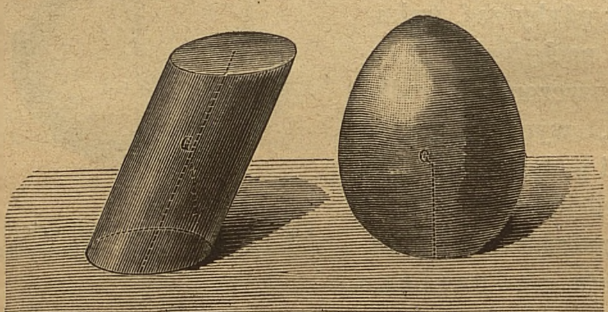


Fig. 33. Równowaga ciał podpartych.

Równowaga ciała jest tem stalszą, im większą jest jego podstawa, im trudniej wyprowadzić pionową, opuszczoną ze środka ciężkości po za tę podstawę. Oprócz tego, stałość równowagi ciała jest tem większą, im niżej znajduje się jego środek ciężkości; dla tego samego bowiem kąta odchylenia, środek

ów nizko leżący jest jeszcze podparty (fig. 37 *G*, a po odchyleniu *G'*—*str.* 64), podczas gdy wyżej leżący już jest po za płaszczyzną podparcia (fig. 37, *C* i *C'*, *str.* 64). Zasady te znalazły liczne zastosowania w praktyce, a czytelnik w codziennem życiu spotka na każdym kroku te zastosowania; powiemy więc tylko, że w ogóle wszystkie ciała, które powinny stać mocno i pewnie, mają szeroką podstawę i możliwie nizko umieszczony środek ciężkości.

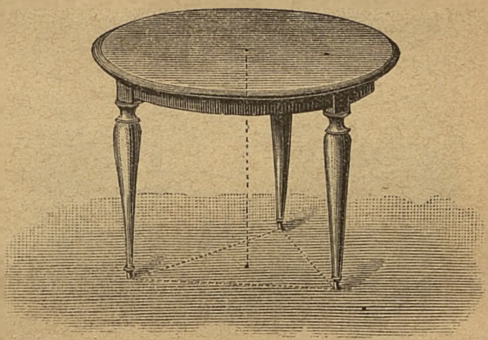


Fig. 34. Równowaga ciała podpartego w trzech punktach

§ 2. Oznaczenie ciężaru ciał. Waga.

Przyrządy, służące do oznaczania ciężaru ciał i znane pod nazwą *wag*, przedstawiają wielką rozmaitość w budowie i urządzeniu. — Zajmiemy się najprzód opisem wag najprostszych, a następnie przejdziemy do bardziej złożonych; przedtem jednak musimy poznać w ogólnych przynajmniej zarysach zasady dźwigni, jestto bowiem niezbędne do zrozumienia teoryi wagi.



Fig. 35. Położenie równowagi osób, dźwigających ciężary.

Dźwignią nazywamy każdy drąg niegiętki, podparty w jednym punkcie, około którego może się obracać. W dźwigni pierwszego rodzaju podparcie (fig. 38, *C*) znajduje się pomiędzy dwoma jej końcami, na które z jednej strony działa ciężar *Q*, a z drugiej jakakolwiek siła *P*. — W dźwigni drugiego rodzaju podparcie znajduje się na jednym jej końcu, na drugi działa siła, a ciężar zawieszony jest pomiędzy niemi (fig. 39). Nareszcie w dźwigni trzeciego rodzaju ciężar i podparcie

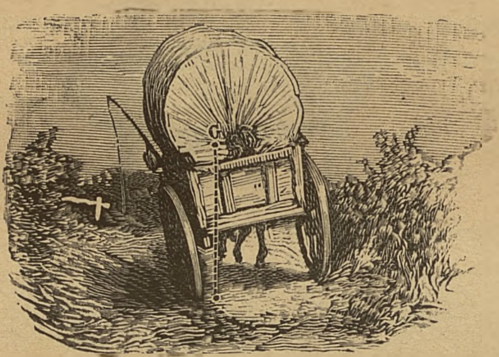


Fig. 36. Równowaga na płaszczyźnie pochyłej.

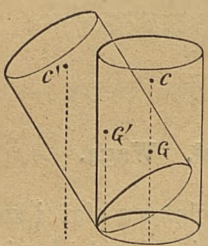


Fig. 37. Wpływ położenia środka ciężkości na równowagę ciała.

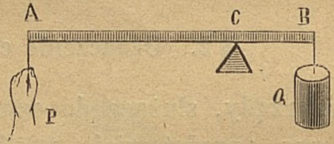


Fig. 38. Dźwignia pierwszego rodzaju.

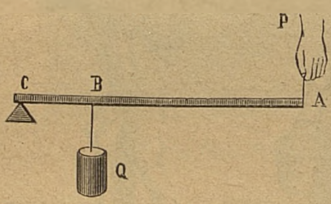


Fig. 39. Dźwignia drugiego rodzaju.

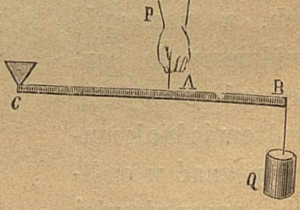


Fig. 40. Dźwignia trzeciego rodzaju.

znajdują się na jej końcach, a siła działa pomiędzy niemi (fig. 40). We wszystkich trzech rodzajach dźwigni, część, leżącą pomiędzy podparciem (*C*) i punktem przyczepienia siły (*A*) nazywamy

Do zeszytu I-go wkradły się następujące pomyłki:

Strona	wiersz	zamiast	*powinno być*
4	2 od góry	wyprężanej	naprężanej
—	w podpisie pod fig. 1	wyprężenie	naprężenie
14	4 od góry	widoczno	widocznie
18	9 od dołu	Maskelyn	Maskelyne
—	7 „	drudzy	drugi
30	7 od góry	1, 4, 3 i t. d.	1, 4, 9

PROSPEKT.

Dzieło A. Guillemin'a „Le monde physique", które w niniejszem opracowaniu wydajemy, przedstawia w sposób przystępny najciekawsze i najważniejsze zjawiska fizyczne. Jest ono przeznaczone dla szerokiego ogółu, który nie posiadając ścisłych wiadomości matematycznych, pragnąłby zapoznać się ze zjawiskami otaczającej przyrody. Znajomość tych zjawisk niezbędną jest dla każdego wykształconego człowieka, zwłaszcza dziś, kiedy nauki przyrodnicze odgrywają tak potężną rolę w postępie myśli ludzkiej. Jaka jest wartość dzieła Guillemin'a świadczy już to jedno, że doczekało się ono w krótkim czasie kilku wydań francuzkich, przekładu niemieckiego, oraz dwóch wydań przekładu angielskiego, dokonanego przez słynnego fizyka Prof. Lockeyera.

Pragnęlibyśmy, aby polskie opracowanie dzieła niniejszego nie ustępowało w niczem świetnym wydaniom francuzkim, niemieckim i angielskim i dla tego pomimo wielkiego nakładu zamówiliśmy u pierwszorzędnych drzeworytników około 600 drzeworytów i do dwudziestu tablic i chromolitografij; wyrazisty druk i piękny satynowany papier przyczynią się również do estetycznego wydania niniejszego dzieła.

Opracowanie powierzyliśmy specyalistom, którzy niewątpliwie wywiążą się dobrze i sumiennie ze swego zadania.

Dzieło to będzie wychodziło zeszytami (w liczbie około 30) w dwutygodniowych odstępach czasu, a cena każdego zeszytu wynosić będzie kop. 20.

Warszawa. Księgarnia nakładowa

H. Olawski.

Довволено Цензурою — Варшава 9 Марта 1889 г.

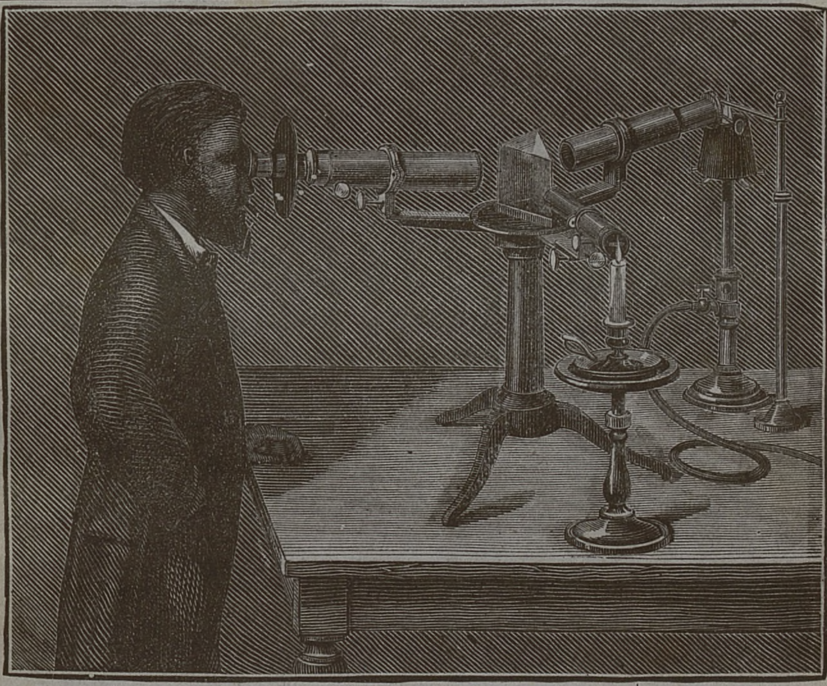
Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop. **Zeszyt 3.** Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła **A. Guillemin'a** „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.



Tabl. IV. **Widmo powietrzne (Fata morgana) w pustyni afrykańskiej.**

Дозв. Ценз. Варшава, 9 Марта 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

ramieniem siły; część zaś pomiędzy podparciem a punktem przyczepienia ciężaru (*B*) nazywamy *ramieniem oporu.* ([1]) Wszędzie ciężar *Q* obniżałby ramię oporu, gdyby mu nie przeciwdziałała siła *P*. Dla równowagi dźwigni potrzeba, ażeby mniejsza siła działała na tyleż razy większe ramię i naodwrót, czyli że siła i ciężar powinny być w stosunku odwrotnym do długości ramion, na które działają. Dźwignie opisane tutaj, przedstawione są na rysunkach w położeniu poziomem, to jest w stanie równowagi: wszędzie siła *P* jest tyle razy większą lub mniejszą od ciężaru *Q*, ile razy mniejszem lub większem jest ramię siły od ramienia oporu.

Jeżeli dźwignia jest podpartą w samym środku, a więc gdy ramiona jej są jednakowe, wtedy dla równowagi potrzeba, ażeby na oba końce dźwigni działały siły równe. *Waga zwyczajna* (fig. 41) przedstawia właśnie dźwignię równoramienną. Widzimy tutaj drąg *A B*, przez środek którego przechodzi trójgraniasty nóż *O*, zwrócony ostrą krawędzią ku dołowi; wystające końce tego noża oparte są z przodu i z tyłu na ramce, na której zawieszoną jest waga, drąg więc może bez wielkiego tarcia przechylać się w jednę i drugą stronę. Ramiona *O A* i *O B*, oprócz jednakowej długości, powinny mieć jednakowy ciężar, wtedy bowiem równoważą się wzajemnie i drąg nieobciążony zajmuje położenie poziome. Po obu stronach wiszą szalki *P P*, służące do nakładania ważonego ciała i gwichtów. Przy jednakowem obciążeniu szalek, drąg powinien zachować położenie poziome; jeżeli zaś na jednę z nich położymy ciężar większy, to drąg musi pochylać się w stronę bardziej obciążoną. Wspólny środek ciężkości wagi po-

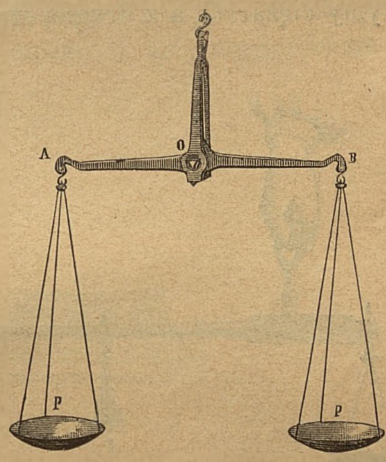


Fig. 41. Waga zwyczajna.

([1]) Jeżeli kierunki działania siły i oporu są prostopadłe do kierunku dźwigni, jak to pokazano na fig. 38, 39 i 40.

winien leżeć poniżej osi, około której drąg się obraca, wtedy bowiem waga znajduje się w stanie równowagi stałej, tak że przy równem obciążeniu szalek, drąg po kilku wahnięciach, powraca do położenia poziomego. W starożytności jeszcze używano wagi, zwanej obecnie *wagą rzymską* (fig. 42). Drąg *A B*, zawieszony na nożu w punkcie *O*, podzielony jest na dwa ramiona: jedno *O A* krótkie i szerokie, drugie *O B*—długie i wązkie. Na końcu krótszego ramienia zawieszoną jest szalka, na której umieszcza się ważone ciało; wzdłuż dłuższego ramienia przesuwa się stały gwicht *P*; po odjęciu tego ostatniego i przy szalce nieobciążonej drąg powinien zajmować położenie poziome. Jeżeli na szalkę położymy ciężar *Q*, a z drugiej strony zawiesimy gwicht *P*, to według powyższej zasady dźwigni, równowaga nastąpi wtedy, gdy odległość gwichtu od punktu zawieszenia będzie w takim stosunku do ramienia *O A*, w jakim ciężar *Q* pozostaje do ciężaru *P*. Na drągu oznacza się podziałki, w ten sposób mianowicie, że na szalce umieszcza się znany ciężar, np. 1 kilogram, a w tym punkcie drąga, w którym należy, dla przywrócenia równowagi, zawiesić gwicht *P*, pisze się znak 1. Kreśląc podobne znaki w odległości dwa, trzy i t. d. razy większej, otrzymujemy punkty, w których powinien być zawieszany gwicht *P* przy obciążeniu szalki 2, 3 . . . . kilogramami. Odległość pomiędzy dwoma znakami dzieli się na dziesięć części, co pozwala określać dziesiąte części kilograma. Waga rzymska jest wygodną z tego względu, że wymaga tylko jednego gwichtu; bardzo jednak ścisłą być nie może.

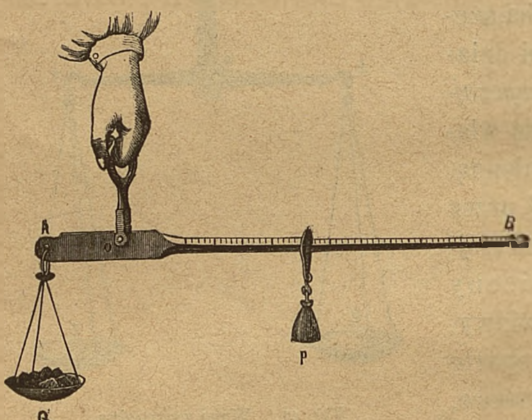


Fig. 42. Waga rzymska.

Waga dziesiętna (fig. 43) łączy wygodę ze ścisłością i dlatego stanowi obecnie przyrząd, mający szerokie praktyczne zastosowanie. Na słupie *H O* oparty jest, za pośrednictwem noża *O*, drąg *A C;* do dłuższego ramienia tego drąga w *C* przyczepioną jest szalka *b c*, służąca do nakładania gwichtów; na drugiem jego ramieniu w *B* i *A* wiszą dwa pręty, podtrzymujące u dołu dwie platformy *G D* i *L K*. Dolna platforma opiera się w *K* o nóż; górna zaś, również za pośrednictwem noża, opiera się o dolną. Ciało ważone umieszcza się na górnej platformie, w dowolnem miejscu; dla wygody, oraz dla ochrony systemu drągów, dodaje się jeszcze drewnianą ścianę *E F*, o którą można oprzeć dany ciężar. Ciało *P*, leżące na górnej platformie, ciśnie na nóż *I*, przezeń na dolną platformę *L K*, następnie za pośrednictwem

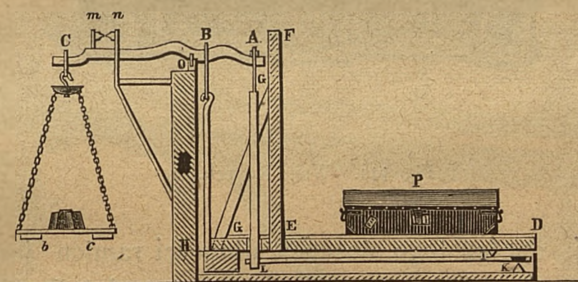


Fig. 43. Waga dziesiętna.

pręta *L A*, swobodnie przechodzącego przez otwór w górnej platformie, ciśnienie to przenosi się na punkt *A* drąga. Oprócz tego ciało ciągnie ku dołowi pręt przymocowany do górnej platformy, przez co ciśnienie jego działa także na punkt *B* drąga. Ramię *L K* jest pięć razy dłuższem od ramienia *I K* i dlatego ciśnienie w punkcie *A* równa się tylko jednej piątej ciśnienia w punkcie *I*. Ponieważ dalej ramię *O A* jest dwa razy krótszem od ramienia *O C*, to dla przeciwdziałania ciśnieniu w *A* należy na szalce umieścić gwicht, którego ciśnienie jest dwa razy mniejsze od tegoż ciśnienia w *A*, a więc dziesięć razy mniejsze od ciśnienia w *I*. Nakoniec ramię *O C* jest dziesięć razy dłuższem od ramienia *O B* i dlatego, dla przeciwdziałania ciśnieniu w *B*, potrzeba na szalkę

położyć gwicht, którego ciśnienie jest dziesięć razy mniejsze. A więc dla równowagi drąga wystarcza, gdy na szalce *b c* leży dziesiąta część ciężaru *P*, umieszczonego na górnej platformie wagi. Równowaga jej ma miejsce wtedy, gdy ostrza *m* i *n* znajdują się na jednej prostej linii.

Do ważenia bardzo wielkich ciężarów, jak np. ładownych wozów, lokomotyw i t. p. używa się wagi podobnej, lecz mocniej

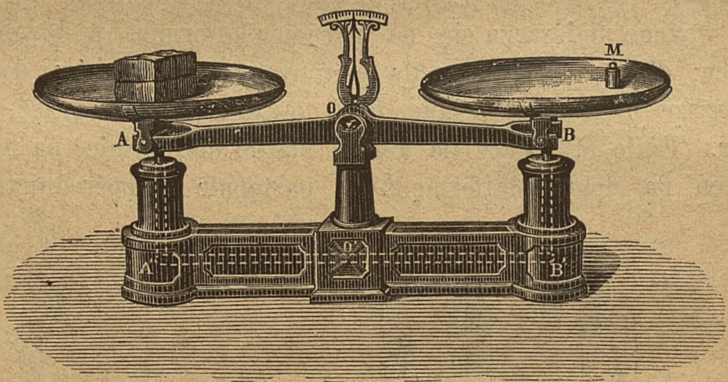


Fig. 44a. Waga Roverbal'a.

zbudowanej; oprócz tego stosunek długości ramion jest taki, że dla równowagi, należy na szalce umieszczać tylko setną część ciężaru ważonego ciała.

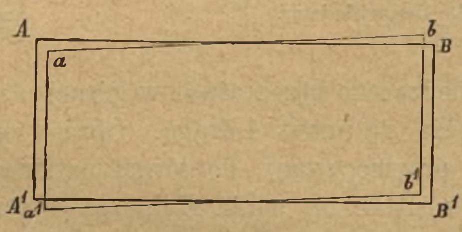


Fig. 44b.

W handlu znajdujemy bardzo często *wagę Roverbal'a* (fig. 44), składającą się z dwóch jednakowej długości drągów *A B* i *A' B'*, z których pierwszy jest widzialny u góry, drugi zaś jest ukryty w podstawie wagi. Leżące nad sobą końce drągów są ze sobą ruchomo połączone za pomocą prętów pionowych; środki drągów opierają się o noże *O* i *O'*, leżące na jednej prostej linii. Końce górnego drąga podtrzymują dwie szalki, na których umieszcza się ważone cialo i gwichty. Dla równowagi potrzeba, ażeby szalki były jednakowo obciążone;

wtedy drągi zajmują położenie poziome, a strzałka, przytwierdzona do górnego drąga, stoi pionowo. Jeżeli na jednę z szalek położymy ciężar większy, drągi zajmą położenie pochyłe i prostokąt *A B A′ B′* (fig. 44*a*) przyjmie postać równoległoboku *a b a′ b′* (fig 44*b*), a jedna z szalek zostanie wzniesioną do góry, druga— opuszczoną ku dołowi.

Wyżej opisane przyrządy wagowe używają się w codziennem życiu, w wypadkach, w których wielka ścisłość nie jest konieczną. Lecz do celów naukowych wymaganą jest waga, nietylko *dokładna*, ale także bardzo *czuła*, to jest taka, która przy bardzo małej różnicy w ciężarze ciał, umieszczonych na szalkach,

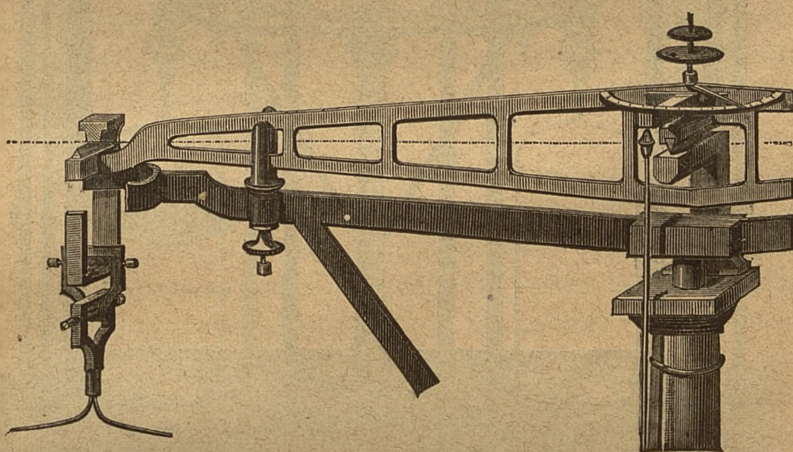


Fig. 45. Ramię wagi chemicznej.

ulega znacznemu odchyleniu od położenia poziomego. Waga jest tem czulszą, im dłuższym i lżejszym jest jej drąg, a także im mniejszą jest odległość jej środka ciężkości od punktu podparcia drąga; oprócz tego, ten ostatni punkt i punkty zawieszenia szalek powinny leżeć na jednej prostej linii, wtedy bowiem czułość wagi jest niezależną od wielkości obciążenia.

Waga chemiczna odpowiada właśnie tym warunkom. Fig. 45 przedstawia jedno jej ramię; na fig. 46 widzimy ją w całości. Drąg tej wagi ma kształt mocno wydłużonego romba, w kilku miejscach wydrążonego, a to w celu możliwego zmniejszenia jego ciężaru. Przez środek drąga przechodzi trójgraniasty nóż sta-

lowy, którego ostra krawędź spoczywa na twardej polerowanej podstawie z agatu. Na końcach drąga znajdują się dwa podobne, lecz mniejsze noże, zwrócone ostrzem ku górze; na nich, za pośrednictwem odpowiednio zgiętych sztabek, zawieszone są szalki. Powyżej środka drąga widzimy dwa krążki, z których górny może być podnoszonym lub opuszczanym, co pozwala zmieniać położenie środka ciężkości całej wagi, a więc umożliwia nada-

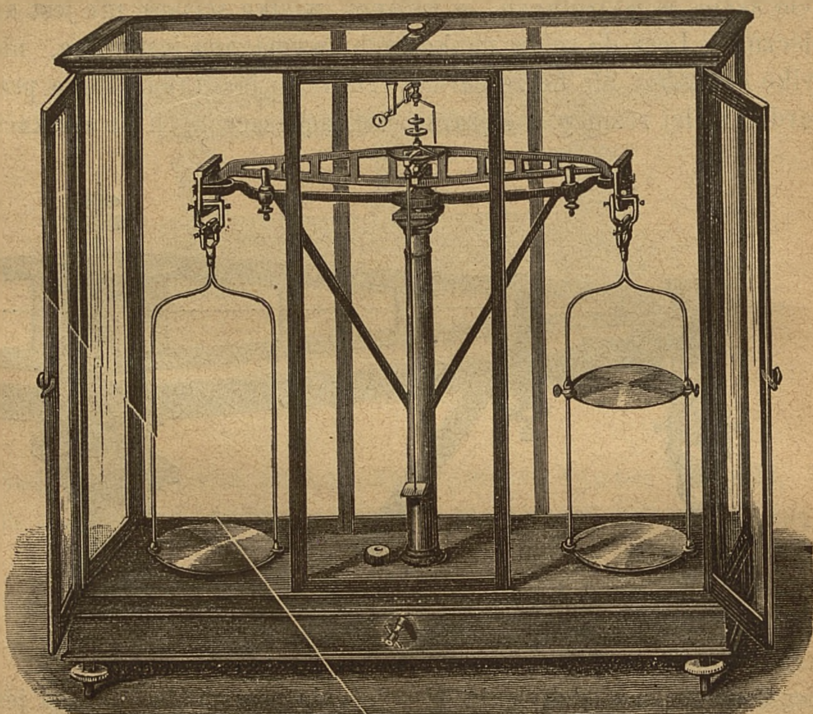


Fig. 46. Waga chemiczna.

wanie jej pożądanego stopnia czułości. Dolny krążek ma po jednej stronie otwór, tak że masa jego jest nierównomiernie naokoło osi rozmieszczoną, co znów pozwala przez obracanie krążka powiększać nieco obciążenie po jednej lub drugiej stronie; w ten sposób mogą być wyrównane niezmiernie małe różnice, spowodowane np. przez obecność ledwo dostrzegalnych pyłków. Z przodu drąga, pośrodku, widać długą wskazówkę, zwróconą ku dołowi; zajmuje ona położenie pionowe, gdy płaszczyzna, przechodząca

przez trzy wspomniane ostrza nożów, jest poziomą. Dolny koniec wskazówki porusza się wzdłuż łuku, na którym oznaczone są podziałki, pozwalające mierzyć wielkość odchylenia; podczas równowagi wskazówka stoi przed podziałką, oznaczoną zerem.

W celu uchronienia wagi od szkodliwych wpływów powietrza i wilgoci, umieszcza się ją w szklanem pudle, którego drzwiczki należy otwierać tylko podczas obciążania szalek. Wewnątrz pudła znajduje się naczyńko z ciałem pochłaniającem wilgoć; cały zaś przyrząd powinien być umieszczony na nieruchomej podstawie. Dla zaoszczędzania noży, po skończonem ważeniu, cały drąg zostaje zwykle podniesiony do góry i unieruchomiony za pomocą ramki metalowej, mającej kształt litery V; mechanizm, poruszający tę ramkę, ukryty jest wewnątrz słupa wagi, a guzik, umieszczony na dole zewnątrz pudła, umożliwia wprawienie w ruch tego mechanizmu.

Widzimy tedy, że waga chemiczna może istotnie być bardzo dokładną i czułą. Rzecz naturalna, że i gwichty używane do takiej wagi, muszą być nadzwyczaj dokładnie obrobione; często też eksperymentatorzy sami przygotowują sobie maleńkie gwichty z drutu platynowego, wymagające szczególnej staranności i pozwalające oznaczać ciężar mniejszy od jednego *miligrama*, to jest tysiącznej części grama. ([1]) Przy użyciu wszakże wagi chemicznej, wyżej opisanej, takie maleńkie gwichty stają się zbyteczne. Tutaj bowiem widzimy pośrodku drąga półkole, wzdłuż którego przesuwa się strzałka, mogąca być obracaną za pomocą mechanizmu, umieszczonego tuż pod górną ścianką pudła; podziałki półkola odpowiadają miligramom, tak że ustawienie strzałki na podziałce 1, 2, 3 .... z lewej strony, znaczy to samo, co obciążenie lewej szalki 1, 2, 3 .... miligramami.

Fizycy uciekają się często do metody *podwójnego ważenia* (metoda Bordy), która pozwala dokładnie określić ciężar ciała nawet wtedy, gdy ramiona drąga wagowego nie są zupełnie ró-

---

([1]) Jestto waga jednego sześciennego centymetra wody dystylowanej przy 4°; tysiąc gramów stanowi jeden kilogram, równający się 2,44 naszego funta.

wne. Umieszczamy tedy dane ciało na jednej szalce, a na drugą sypiemy śrótu lub piasku, aż do nastąpienia równowagi; następnie zdejmujemy ciało, a na jego miejscu kładziemy gwichty tak długo, dopóki równowaga nie zostanie przywróconą; rozumie się, że gwichty te przedstwiają dokładny ciężar ważonego ciała.

Na zakończenie rozdziału powiemy jeszcze o pewnej własności ciał, dającej się oznaczyć za pomocą wagi. Wiadomo mianowicie, że równe objętości różnych ciał posiadają niejednakowy ciężar, że np. dana objętość drzewa waży mniej, niż taka sama objętość żelaza, szkła lub kamienia. Zwykle porównywa się ciężar wszystkich ciał stałych i płynnych do ciężaru równej objętości wody dystylowanej, mającej 4^0, a liczbę, jaką otrzymujemy z podzielenia ciężaru danego ciała przez ciężar równej objętości wody, nazywamy *ciężarem właściwym* tegoż ciała. Naprzykład ciężar właściwy srebra wynosi 10,47, to znaczy, że metal ten waży tyleż razy więcej od wody, wziętej w takiej samej co on objętości. Widzimy tedy, że pojęcie o ciężarze właściwym jest w związku z ciężarem ciał, to jest z działaniem na nie siły ciężkości.

Jeżeli zaś porównamy masę czyli ilość materyi danego ciała do masy równej objętości wody, to stosunek dwóch tych mas zowie się *gęstością* tegoż ciała. Wiemy już, że jakkolwiek masy ciał są niezależne od siły ciężkości, to jednak ciężar ich daje nam miarę wielkości ich mas ([1]), a więc np. ciała jednakowo ciężkie zawierają jednakową ilość materyi. Wynika z tego, że stosunek ciężarów dwóch ciał równa się stosunkowi ich mas, czyli że *ciężar właściwy* i *gęstość* ciał wyrażone są przez jedne i te same cyfry. Pomimo to, należy ściśle odróżniać dwa te pojęcia, jedno bowiem wiąże się z ciężarem ciał, drugie—z ich masą. O metodach, za pomocą których można oznaczyć ciężar właściwy ciał, powiemy obszernie w jednym z następnych rozdziałów.

([1]) Pod warunkiem, że ciężar tych mas oznaczamy w jednem i tem samem miejscu na ziemi.

ROZDZIAŁ V.

Działanie ciężkości na ciała ciekłe.

§ 1. Własności cieczy.

Codziennie jesteśmy świadkami wielu rzeczy, w wysokim stopniu zasługujących na naszą uwagę, które jednak przechodzą niepostrzeżenie, nie pobudzając nas wcale do zastanowienia się nad niemi. Tu należą naprzykład rozmaite postacie, w jakich występują ciała, bądź to znajdujące się w stanie stałym, ciekłym lub gazowym, bądź to przechodzące z jednego z tych *stanów skupienia* w inny. Na czem właściwie polega różnica między lodem i wodą i co się dzieje, gdy ta ostatnia zamienia się w parę? Jakie zmiany zachodzą w układzie cząstek ciała w chwili, gdy ono topnieje lub się ulatnia, albo przeciwnie—gdy krzepnie lub się skrapla? Na pytania te nauka dopiero zaczęła dawać określone odpowiedzi, dokładne bowiem zbadanie rzeczonych zjawisk i warunków, od jakich zależą, połączone jest z trudnościami, z których małą zaledwie część udało się przezwyciężyć. W końcu księgi o cieple wyłuszczymy bliżej najnowsze poglądy na naturę różnych stanów skupienia oraz na procesy, zachodzące przy zmianach stanu; tutaj zaś ograniczymy się tylko ogólną charakterystyką stanów skupienia, zwłaszcza ciekłego, o ile to jest niezbędnem do zrozumienia poniżej omówionych zjawisk.

Kształt kawałka ołowiu możemy zmienić, wywierając nań ciśnienie w jednym jakimkolwiek kierunku, przyczem nie potrzebujemy go podpierać z boków; pręt drewniany możemy rozłamać, podpierając oba jego końce i uciskając mniej lub więcej silnie środek; drut metalowy możemy rozerwać, przymocowując jeden jego koniec i zawieszając na drugim bardzo wielki ciężar. Ciała te posiadają, jak powiadamy, wielką spójność,—co znaczy, że cząstki ich silnie nawzajem się trzymają, tak że dla ich przesunięcia lub rozłączenia należy użyć znacznej siły—i możemy na nie wywierać silne ciśnienie lub ciągnienie, nie naruszając ich całości. Ciała takie nazywamy *stałemi*, cechują się one samodzielną objętością i samodzielną postacią.

Przeciwnie, jeżeli na wodę, spirytus, kwas siarczany, nie zawarte w naczyniu, a więc nie podparte z boków, wywieramy chociażby bardzo słabe ciśnienie, wtedy cząstki tych ciał natychmiast rozbiegają się na wszystkie strony; jeżeli przechylimy szklankę z wodą, część jej, bezpośrednio nie podparta, oddzieli się od reszty i spadnie na ziemię. Cząstki tych ciał są tak luźno z sobą związane, tak łatwo ruchliwe, że do ich przesunięcia lub zupełnego rozłączenia wystarcza już bardzo słaba siła. Jednakże spójność w tych ciałach, jakkolwiek słabsza niż w ciałach stałych, jeszcze istnieje, posiadają one więc samoistną objętość, nie mają atoli, wskutek wielkiej ruchliwości swych cząstek, samodzielnej postaci, lecz przyjmują kształt naczynia, w którem się znajdują. Ciała takie zowią się *cieczami*.

Nalejmy trochę wody do obszernego naczynia: woda zbierze się na dnie i odgraniczy się wyraźnie zarysowaną płaszczyzną od znajdującego się nad nią powietrza; tak samo zachowują się wszystkie ciecze. Jeżeli natomiast do opróżnionego zamkniętego naczynia wprowadzimy najmniejszą chociażby ilość powietrza, wodoru lub kwasu węglanego, każde z tych ciał natychmiast się rozszerzy, całkowicie i jednostajnie wypełniając naczynie tak, że w każdym jego centymetrze sześciennym będzie się znajdowała jednakowa ilość powietrza, wodoru lub kwasu węglanego. Spójność w takich ciałach jest prawie żadna, nie mają one, podobnie jak i ciecze, samoistnej postaci, tem się jednak różnią od tych ostatnich, że nie posiadają także samodzielnej objętości, lecz zajmują każdą wolną przestrzeń, rozszerzając się rak długo, dopóki nie napotkają przeszkody; nie można ich więc przechowywać w otwartem naczyniu. Ciała takie zowią się *gazami*.

Niektórzy oznaczają ciecze i gazy wspólnem mianem płynów, rozumiejąc pod temi ostatniemi w ogóle takie ciała, które, wskutek wielkiej ruchliwości swych cząstek, nie posiadają samodzielnej postaci; płyny tem się różnią od ciał stałych, że nie będąc podparte z boków, nie wytrzymują najlżejszego chociażby ciśnienia w jednym tylko kierunku. Niektóre, niżej wyszczególnione prawa, wynikające z wielkiej tej ruchliwości cząstek, stosują się w równej mierze do wszystkich płynów—tak do cieczy, jak i do gazów.

Odkładając badanie własności gazów do jednego z następnych rozdziałów, zwróćmy się teraz do bliższego rozważenia cieczy. Powiedzieliśmy już wyżej, że w cieczach spójność, jakkolwiek słabsza niż w ciałach stałych, jednak jeszcze istnieje; otóż możemy się o tem przekonać za pomocą bardzo prostych doświadczeń. Zetknijmy z powierzchnią wody płytę z materyału, który zostaje zwilżony przez wodę, naprzykład ze szkła (fig. 47), a zobaczymy, że chcąc odjąć płytę, trzeba użyć pewnej siły; gdy to nastąpi, dostrzeżemy na płycie cienką warstewkę wody, z czego wnosimy, że owa siła zużytą została na przezwyciężenie spójności cieczy, na oderwanie warstewki wody, pozostałej na płycie od reszty cieczy.

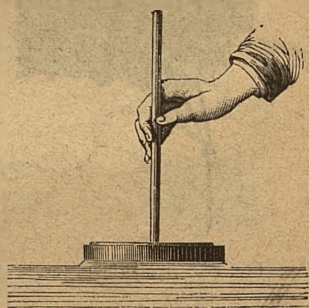


Fig. 47. Spójność cieczy.

Gdybyśmy do powyższego doświadczenia, zamiast szklanej, użyli płyty z takiego materyału, który nie zostaje zwilżony przez wodę, naprzykład z mosiądzu, to i wtedy musielibyśmy użyć pewnej siły na odłączenie płyty; ponieważ jednak w tym razie nie przezwyciężamy spójności cieczy, płyta bowiem mosiężna po odjęciu od wody jest suchą, musimy więc przyjąć, że dana siła zużytą tu zostaje na oderwanie mosiężnej płyty od wody, na przezwyciężenie *przylegania* wody do mosiądzu. A oto inne, jeszcze bardziej pouczające doświadczenie: zanurzmy pałeczkę szklaną w wodzie i następnie ostrożnie wyjmijmy ją; zobaczymy, że pałeczka jest zwilżona, co dowodzi, że przyleganie wody do szkła jest silniejszem od spójności między samemi cząstkami wody. Dalej spostrzegamy, że woda spływa po pałeczce i zbiera się na dolnym jej końcu w postaci kropli; tworzenie się tej ostatniej dowodzi istnienia spójności pomiędzy cząstkami wody, inaczej bowiem dolne części kropli, ulegając działaniu ciężkości, oderwałyby się od górnych. Utworzona kropla, wciąż się powiększając wskutek ściekającej wody, odrywa się w końcu i spada na ziemię, następuje zaś to w chwili, gdy działanie ciężkości na kroplę może pokonać jej spójność. Istnienia

spójności w cieczach dowodzi także kulista postać kropli rosy na liściach (fig. 48) lub kropli rtęci, wylanej na płytę, której ona nie zwilża, naprzykład na płytę drewnianą (fig. 49); bez tej spójności drobne te ciekłe masy rozpostarłyby się, wskutek działania ciężkości, po powierzchni, na której spoczywają; działanie to zostaje w tym razie przezwyciężone przez spójność cząstek wody, względnie rtęci.



Fig. 48. Kulista postać kropli rosy.

Różnica więc pomiędzy ciałami stałemi a ciekłemi polega tylko na różnym stopniu spójności, która u pierwszych jest tak wielką, że utrudnia wzajemne przesuwanie lub rozłączenie cząstek, u drugich zaś—tak nieznaczną, że najsłabsze już siły zewnętrzne mogą ją zniweczyć. Atoli i spójność ciał stałych możemy przezwyciężyć, wywierając na nie dostatecznie wielkie ciśnienie; Tresca mianowicie wykazał, że najtwardsze nawet i najgęstsze ciała stałe mogą pod wpływem bardzo znacznego ciśnienia wykonywać ruch, niewiele się różniący od zjawiska wypływu cieczy, nie zmieniając przytem swego stanu skupienia. Zjawisko podobne do wypływu cieczy możemy także wywołać u ciał stałych, rozdrabniając je na bardzo d e l i k a t n y proszek i pomieszczając w naczyniu, na dnie którego znajduje się niewielki otwór (fig. 50, str. 77).

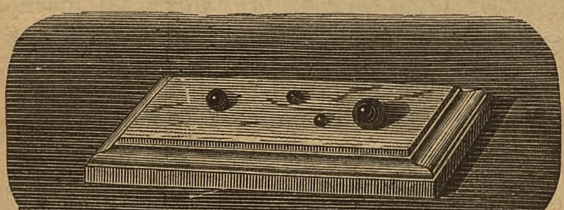


Fig. 49. Spójność cieczy: krople rtęci.

Podczas jednak gdy ciała stałe zachowują się w podobny sposób tylko w razie, gdy wywieramy na nie bardzo wielkie ci-

śnienie, albo gdy są delikatnie sproszkowane, ciecze czynią to już pod wpływem bardzo słabych sił; tak naprzykład spójność wielkich mas wody, spadających ze znacznej wysokości, zostaje przezwyciężoną przez opór powietrza, który sprawia, że masy te rozszczepiają się na bardzo drobny pył (patrz str. 16).

Podobnie jak u ciał stałych, tak i u cieczy znajdujemy różne stopniowania spójności: znamy takie ciecze, jak melasa, różne żywice, stopiona siarka przy pewnych temperaturach, tłuste oleje i t. d., których cząstki powoli tylko zmieniają swe położenie i dopiero po pewnym czasie wypełniają wklęsłości naczynia, w którem się znajdują; wypływanie ich jest bardzo powolnem, a cząstki nie tak łatwo się rozłączają; ciecze takie nazywamy *ciągłopłynnemi*. Inne znowu, jak woda, zwłaszcza gorąca, alkohol, eter i t. d. odznaczają się bardzo wielką ruchliwością cząstek—są to ciecze *lekkopłynne*. Nareszcie odróżniają jeszcze trzeci rodzaj cieczy—*ciężkopłynnych*, do których należą rtęć i stopione metale. Zaznaczmy tutaj, że ciepło i ciśnienie wywierają wielki wpływ na zmianę stopnia spójności ciał; o wpływie tym pomówimy szczegółowo w nauce o cieple.

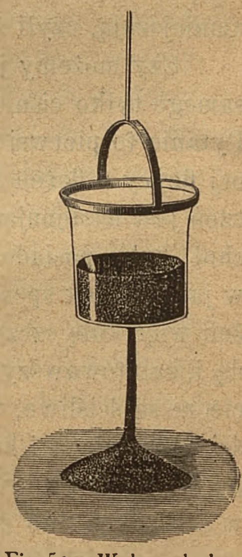


Fig. 50. Wpływ drobno sproszkowanych ciał.

Z powodu łatwej ruchliwości cząstek, ciecze nie mają porów we właściwem tego słowa znaczeniu,—to jest luk, dostrzegalnych gołem okiem, albo dających się rozpoznać przy pomocy mikroskopu,—jak np. gąbka lub papier; gdyby w masie cieczy na chwilę utworzyła się jakaś większa luka, łatwo przesuwalne cząstki wnetby ją wypełniły. Najsilniejsze też szkła powiększające nie wykazują nam w cieczy żadnych luk, t. j. wolnych przestrzeni, któreby nie były zajęte przez jej masę; każda ciecz *wydaje nam się* absolutnie ciągłą. Przedwczesnym jednak byłby wniosek, jaki możnaby wyprowadzić na mocy takiego świadectwa mikroskopu, że nie istnieją wcale wolne przestrzenie między cząstkami cieczy; niektóre zjawiska zniewalają nas raczej do wręcz przeciwnego przypuszczenia. Jeżeli np. do ściśle

odmierzonego litra bardzo stężonego alkoholu dolejemy takiż litr wody, to, po dokładnem ich zmięszaniu i doprowadzeniu mięszaniny do pierwotnej temperatury, otrzymamy w rezultacie nieco mniej niż dwa litry cieczy; zjawisko to daje się wytłómaczyć jedynie przypuszczeniem, że podczas mięszania cząstki alkoholu wchodzą w wolne przestrzenie, rozdzielające cząstki wody, te ostatnie zaś — w wolne przestrzenie między cząstkami alkoholu. Na korzyść takiego poglądu przemawia także dobrze znany fakt, że objętość cieczy, za nielicznemi wyjątkami, stale zmniejsza się w miarę jej oziębiania, co tłómaczymy sobie w ten sposób, że przy obniżeniu temperatury wolne przestrzenie między cząstkami cieczy się zmniejszają, czyli że same te cząstki zbliżają się ku sobie.

Czy możemy jednak zmniejszyć objętość cieczy za pomocą samego tylko ciśnienia, albo innemi słowy, czy ciecze są *ściśliwe?* Pytanie to pierwsi usiłowali rozstrzygnąć na drodze doświadczalnej fizycy z florenckiej Academia del Cimento. Myśl ich doświadczeń jest następująca: ze wszystkich brył o jednakowej powierzchni kula posiada największą objętość, tak, że odkształcając w jakikolwiek sposób kulę, zawsze zmniejszamy jej objętość; jeżeli więc kulę szczelnie wypełnimy jakąś cieczą, naprzykład wodą i, zalutowawszy ją, poddamy silnemu ciśnieniu, to w razie gdy ciecze są ściśliwe, woda zmieści się także w zmniejszonej objętości odkształconej kuli, w przeciwnym razie przesiąknie ona przez jej ściany. Próby, wykonane w opisany sposób z wodą, zawartą w srebrnych lub złotych kulach, pokazały, że woda przesiąka przez pory ich ścianek, z czego wzmiankowani fizycy wyprowadzili wniosek, że za pomocą samego tylko mechanicznego ciśnienia nie można zmniejszyć objętości cieczy. Próby te atoli nie są dostatecznie przekonywającemi, niewiadomo bowiem, jakby się zachowywała woda lub inna jakaś ciecz w naczyniu z tak spójnego materyału, przez który nie mogłaby przesiąkać. Późniejsze też doświadczenia, podjęte w celu sprawdzenia tego wniosku, wykazały niedokładność eksperymentów akademików florenckich; różni fizycy dowiedli, że ciecze są ściśliwe i zdołano nawet dokładnie oznaczyć stopień tej ściśliwości dla różnych cieczy, wystawionych na działanie pewnego określonego ciśnienia przy da-

nej temperaturze. Z doświadczeń tych okazało się, że, przy temperaturze 0^0, objętość rtęci pod wpływem ciśnienia jednej atmosfery ([1]) zmniejsza się zaledwie o 0,000003, wody—o 0,00005, alkoholu etylowego—o 0,00008 i t. d.; ściśliwość cieczy, jak widzimy, jest nadzwyczaj małą, możemy ją więc, bez popełnienia znacznego błędu, w dalszych naszych wywodach pominąć.

§ 2. Jednostajne rozchodzenie się ciśnienia w cieczy. Prawo Pascala. Prasa hydrauliczna.

Z nader łatwej ruchliwości cząstek cieczy wynika, że znajduje się ona w równowadze tylko wtedy, gdy siły, działające na każdą jej oddzielną cząstkę wzajemnie się równoważą, gdy więc, naprzykład, ciśnienia na cząstkę z dwóch stron przeciwnych są dokładnie jednakowe; inaczej bowiem cząstka ta, ulegająca, jak widzieliśmy, wpływowi najsłabszej nawet siły, posunęłaby się w kierunku silniejszego ciśnienia. Dalej z tejże własności wynika, że ciśnienie, w jakimkolwiek kierunku doznawane przez zamkniętą dokoła ciecz, jednostajnie się rozchodzi wewnątrz całej jej masy, podobnie jak przy naciskaniu woreczka grochu lub piasku, ziarna ich rozbiegają się na wszystkie strony i uciskając ściany woreczka, wydymają go. Cząstki cieczy, bezpośrednio uciskane, usuwają się (ciecze bowiem są prawie zupełnie nieściśliwe) i cisną z kolei na najbliższe cząstki, te znowu na sąsiednie i t. d., aż ciśnienie nie wyrówna się w całej jej masie.

Pascal pierwszy w r. 1650 odkrył prawo, dotyczące zachowania się cieczy pod tym względem; brzmi ono jak następuje: *ciśnienie, wywierane na zamkniętą ze wszech stron ciecz, rozchodzi się jednostajnie poprzez całą jej masę tak, że każda jednakowa powierzchnia wewnątrz i na granicy cieczy doznaje jednakowego ciśnienia, a więc dwa, trzy, cztery i t. d. razy większa powierzchnia doznaje tyleż razy większego ciśnienia.* Jeżeli przeto wypełnimy jakąś cieczą naczynie, opatrzone równemi walcowatemi otworami

---

([1]) Ciśnienie jednej atmosfery równa się ciśnieniu, wywieranemu przez ciężar 1,033 kilogr. na 1 centymetr kwadratowy.

(fig. 51), w które wchodzą dokładnie dopasowane tłoki i następnie będziemy wywierali na jeden z tych tłoków pewne ciśnienie, to musimy na każdy z pozostałych wywierać z zewnątrz dokładnie takie samo ciśnienie, ażeby przeciwważyć ciśnienie, doznawane przez te tłoki od wewnątrz. Pominęliśmy przytem ciężar samej cieczy; chcąc twierdzenie to wykazać doświadczalnie, należałoby uwzględnić także ciśnienie, jakie ciecz ciężarem swym wywiera na własne swe cząstki, oraz na ściany naczynia. A teraz wykonajmy inne doświadczenie: nalejmy wody do naczynia, utworzonego z dwóch walcowatych rur o nierównej średnicy, połączonych u dołu kanałem; następnie, zamknąwszy rury dokładnie dopasowanemi tłokami, pomieśćmy na węższym z nich gwicht, ważący

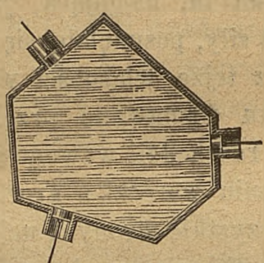


Fig. 51. Jednostajne rozchodzenie się ciśnienia w cieczy.

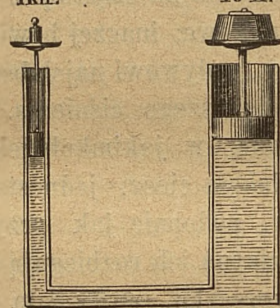


Fig. 52. Zasada prasy hydraulicznej.

1 kilogram (fig. 52); wtedy każda powierzchnia cieczy lub ściany naczynia, równa dolnej powierzchni tego tłoku, będzie doznawała ciśnienia 1 kilograma. Chcąc więc utrzymać drugi tłok na tej samej wysokości co i pierwszy, musimy na tamtym położyć tyle razy większy ciężar, ile razy dolna powierzchnia jego jest większą od dolnej powierzchni węższego tłoku. Jeżeli naprzykład stosunek tych powierzchni jest jak 1 do 16, wtedy, dla równowagi, należy szerszy tłok obciążyć 16 kilogr. I przy tem doświadczeniu pominęliśmy, dla uproszczenia sobie zadania, ciężar samych tłoków; właściwie zaś równowaga będzie miała miejsce wtedy, gdy stosunek ciężarów tłoków wraz z pomieszczonemi na

nich gwichtami będzie taki sam, jak stosunek powierzchni poprzecznych przekrojów tłoków. Możemy więc dowolnie zwiększać ciśnienie, wywierane na wodę (albo jakąkolwiek inną ciecz), jeżeli tylko postaramy się o to, aby ta ostatnia z kolei cisnęła na dostatecznie wielką powierzchnię, jak to widzimy na fig. 52. Na tej właśnie zasadzie polega maszyna, mająca bardzo szerokie praktyczne zastosowanie, zwana *prasą hydrauliczną* (¹).

Myśl urządzenia takiej maszyny pierwszy powziął był Pascal; przy praktycznem urzeczywistnieniu tej myśli napotkał on atoli jednę trudność (niżej będzie o niej mowa), której nie mógł przezwyciężyć i dopiero w wiele lat po nim, mianowicie w r. 1797 angielski inżynier Bramah zbudował prasę, odpowiadającą celowi.

Budowę prasy hydraulicznej—w postaci, w jakiej obecnie powszechnie się używa—pokazują figury 53 i 54 (str. 82). Składa się ona z walcowatej pompy *A*, połączonej za pomocą rurki *d* z obszernem walcowatem naczyniem *B*, w którem może się posuwać w górę i na dół dokładnie dopasowany tłok *C*. Do górnego końca tego tłoka przymocowaną jest płyta *K*, poruszająca się wraz z nim wzdłuż 4 słupów, na których spoczywa stała płyta *M N*; między tą ostatnią i płytą *K* pomieszcza się przedmioty, które chcemy poddawać bardzo silnemu ciśnieniu. Przedmioty te zostają silnie sprasowane, gdy tłok *C*, wskutek ciśnienia od dołu podnosi się, co dokonywa się za pomocą pompy ssąco-tłoczącej *A* (²), wsysającej wodę ze zbiornika *P* i wtłaczającej ją następnie przez rurkę *d* do naczynia *B* (fig. 54). Tłok tej pompy porusza się w górę i na dół za pomocą dźwigni drugiego rodzaju *O;* przy podnoszeniu tłoka, woda wchodzi do wnętrza pompy, przy spychaniu zaś tłoka woda wchodzi do rurki *d*, a następnie do *B*.

Wskutek gwałtownego ciśnienia, jakiego woda doznaje w *B*, przesiąkałaby ona przez szczeliny, zawsze znajdujące się pomiędzy tłokiem *C*, a ścianami naczynia *B* — nawet przy użyciu najdoskonalszego materyału — gdyby nie zdołano temu zapobiedz.

(¹) Od greckiego wyrazu: hydor—woda.

(²) Bliższe szczegóły o pompach czytelnik znajdzie w jednym z następnych rozdziałów.

O przeszkodę tę właśnie rozbijały się wszelkie próby Pascala

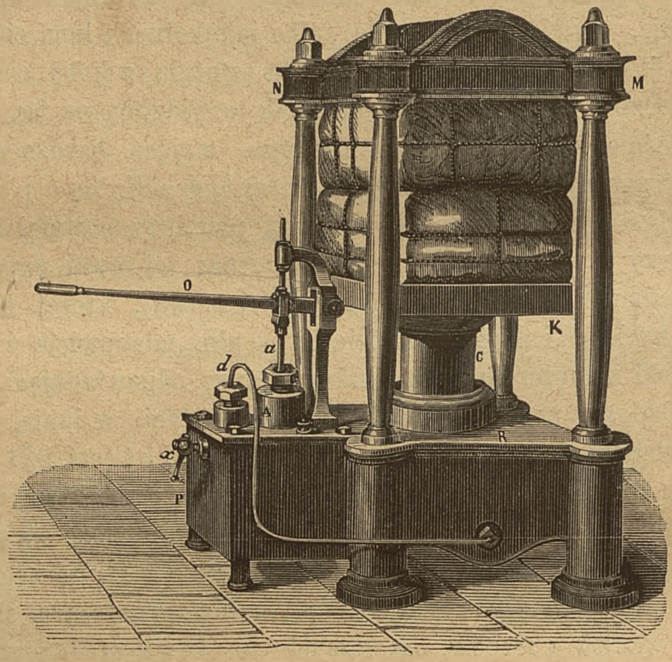


Fig. 53. Prasa hydrauliczna.

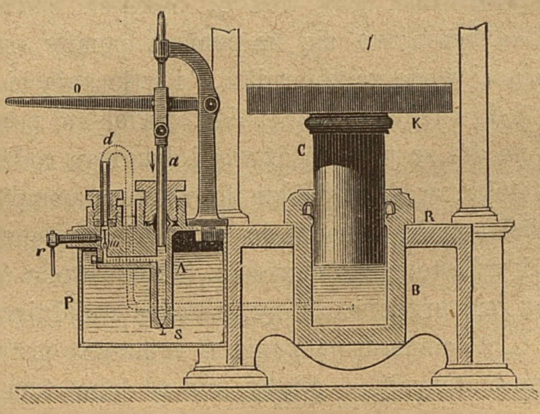


Fig. 54. Pionowy przekrój prasy hydraulicznej.

zbudowania dobrej prasy hydraulicznej i dopiero Bramah zdołał przeszkodę rzeczoną usunąć, a to za pomocą następującego, bar-

dzo dowcipnego sposobu: W wyżłobieniu, biegnącem dokoła wewnętrznej powierzchni ściany naczynia *B*, pomieścił on pierścień z nieprzemakalnej skóry, mający postać rynienki, otwartej od dołu (fig. 55); przy takiem urządzeniu, im gwałtowniej woda jest ściskaną, tem lepiej wchodzi ona w wolną przestrzeń pomiędzy ściankami pierścienia i tem silniej przyciska jednę z nich (zewnętrzną) do ścian naczynia *B*, drugą zaś (wewnętrzną) do tłoka *C*, objętego dokoła przez ten pierścień. W ten sposób pierścień doskonale zapobiega wszelkiemu przesiąkaniu wody, szczelnie zamykając najwęższe nawet szczeliny.

Ciśnienie, jakie możemy otrzymać za pomocą prasy hydraulicznej, zależy od stosunku dolnych powierzchni tłoków *C* i *a*. Niechaj, naprzykład, pierwsza będzie 100 razy większą od drugiej, wtedy tłok *C* będzie doznawał od dołu do góry ciśnienia 100 razy większego niż to, jakie wywieramy z góry na dół na mały tłok *a*. Ciśnienie to możemy nadto powiększyć za pośrednictwem dźwigni *O*; jeżeli naprzykład ramię siły jest 5 razy dłuższem, aniżeli ramię oporu ([1]), wtedy ciśnienie wywierane na mały tłok jest również 5 razy większem i tyleż razy większem jest ciśnienie na duży tłok. Przy podanych stosunkach powierzchni obu tłoków i długości ramion drąga, robotnik uciskający koniec drąga z siłą 30 kilogramów, wywiera na duży tłok, a więc i na przedmioty pomieszczone na znajdującej się na nim płycie, ciśnienie 15,000 kilogr.



Fig. 55. Pierścień skórzany w prasie hydraulicznej.

Prasa hydrauliczna używa się do wyciskania oleju z nasion,— soku cukrowego z buraków, do gładzenia papieru, do prasowania sukna, bawełny i innych podobnych materyj, dalej do próbowania mocy łańcuchów, płyt pancerników i t. d., a także do wciskania powietrza w wielkie przestrzenie i przy wielu innych jeszcze robotach. Łatwo także pojąć, że po odjęciu górnej stalej płyty (patrz fig. 53) można za pomocą prasy hydraulicznej podnosić

(1) Patrz str. 64.

bardzo wielkie ciężary, naprzykład przy budowie mostów, przy wznoszeniu różnych budowli i t. d.

§ 3. Własności cieczy, wynikające z jednostajnego rozchodzenia się ciśnienia i z ich ciężaru.

Mówiac o kierunku spadku ciał, powiedzieliśmy (str. 17), że niewielka powierzchnia spoczywającej cieczy przedstawia płaszczyznę, prostopadłą do kierunku pionowego, czyli poziomą; obecnie możemy pokazać, dlaczego tak jest. Gdyby mianowicie powierzchnia ta nie była poziomą płaszczyzną, wtedy cząstka naprzykład *M* (fig. 56) znajdowałaby się jakby na równi pochyłej i, będąc łatwo ruchliwą, stoczyłaby się po niej wskutek własnego swego ciężaru; to samo dotyczy innych cząstek. Pojmujemy tedy, że równowaga cieczy nie pierwej się ustali, aż nie znikną wszelkie pochyłości jej powierzchni, innemi słowy, aż nie stanie się ona wszędzie prostopadłą do kierunku działania ciężkości, a więc poziomą; dlatego też najwyższą powierzchnię cieczy nazywamy krótko jej *poziomem*. Dla niewielkiej masy cieczy, pionowe, opuszczone z różnych jej punktów, są równoległe między sobą, powierzchnia jej stanowi przeto *płaszczyznę* poziomą; dla wielkich natomiast mas cieczy, jak dla mórz, a nawet większych jezior, pionowe te nie są już równoległe między sobą i powierzchnie ich stanowią część powierzchni kulistej—tylko taka bowiem powierzchnia jest wszędzie prostopadłą do kierunku pionowego.

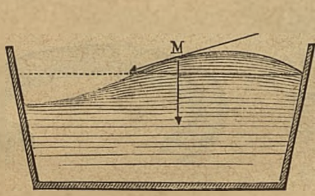


Fig. 56. Powierzchnia spoczywającej cieczy nie może być pochyłą.

Zobaczmy teraz, co zachodzi we wnętrzu i na granicach spoczywającej cieczy. Ponieważ każda jej cząstka podlega działaniu ciężkości, ciśnie więc ona swym ciężarem na inne tak, że każda warstewka doznaje ciśnienia cieczy nad nią będącej i to tem większego, im głębiej jest położoną. Jakiż jest ogólny rezultat ciśnień wszystkich cząstek cieczy? Doświadczenie nam to pokaże. Weźmy walcowate naczynie, otwarte od dołu i, osadziwszy je

metalową oprawą w trójnogu (fig. 57), zamknijmy dolny otwór ruchomem dnem, utworzonem z dokładnie doń przystającej tafelki, którą za pomocą nici przyczepiamy do jednej szalki wagi, jak to pokazuje załączona figura. Na drugą szalkę połóżmy gwichty, dokładnie równoważące tafelkę, a oprócz nich jeszcze nadciężarek określonej wagi, dzięki któremu tafelka zostaje silnie przyci-

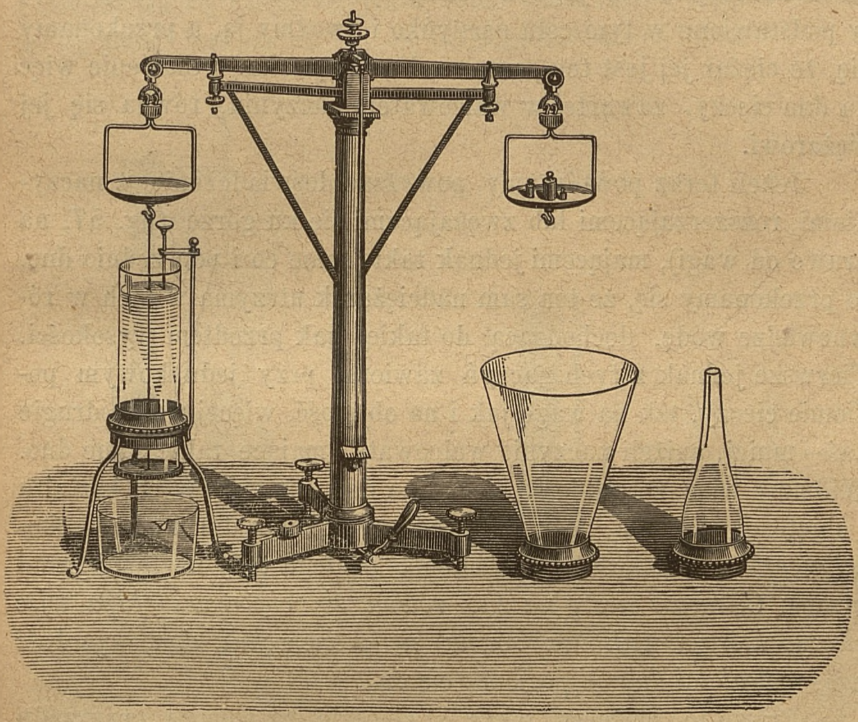


Fig. 57. Ciśnienie cieczy na dno.

śniętą do naczynia; następnie zaś ostrożnie lejmy wodę do tego ostatniego [1]. Ciecz ta, nagromadzając się w naczyniu, coraz silniej uciska dno, aż nareszcie następuje chwila, w której ciężar jej ściśle równoważy nadciężarek, pomieszczony na drugiej szalce. Jeżeli dolejemy jeszcze więcej wody, wtedy tafelka, wskutek zwiększonego ciśnienia, obluźni się i woda zacznie wypływać

---

[1] Zamiast wody, do poniższych doświadczeń możemy użyć jakiejkolwiek innej cieczy; rezultat od tego się nie zmieni.

z naczynia; przez to jednak ilość wody, a więc i jej ciśnienie się zmniejszy tak, że po pewnym czasie tafelka znowu szczelnie będzie przylegała do naczynia. W ten sposób łatwo możemy znaleźć punkt, do którego woda powinna dochodzić w naczyniu wtedy, gdy nadciężarek dokładnie wystarcza do jej zrównoważenia; punkt ten oznaczamy za pomocą sztyfcika, który zeszrubowujemy aż do zetknięcia się jego z wodą. Zbierzmy teraz całą wodę w podstawione w tym celu naczyńko i zważmy ją, a przekonamy się, że ciężar jej jest ten sam, co i nadciężarka. Ciśnienie więc na dno cieczy, zawartej w walcowatem naczyniu, równa się jej ciężarowi.

Jeżeli teraz powtórzymy powyższe doświadczenie z naczyniami, rozszerzającemi lub zwężającemi się ku górze (fig. 57, na prawo od wagi), mającemi jednak takie same co i poprzednio dno, to przekonamy się, że ten sam nadciężarek utrzyma w nich w równowadze wodę, dochodzącą do takiej jak przedtem wysokości. Pierwsze jednak z tych naczyń zawiera, przy jednakowym poziomie cieczy, tak na wagę jak i na objętość, więcej wody, drugie zaś—mniej, aniżeli naczynie walcowate, mające takie same dno. Widzimy więc, że ciśnienie cieczy na dno nie zależy od kształtu i objętości naczynia, lecz tylko od powierzchni dna i od wysokości cieczy. Wielkość tego ciśnienia podlega tedy następującemu prawu: *Ciśnienie cieczy na dno równa się ciężarowi słupa tejże cieczy, którego podstawa równa się powierzchni dna, wysokość zaś—odległości dna od poziomu cieczy.*

Prawo to możemy także stwierdzić za pomocą przyrządu Haldat'a, polegającego na innej zasadzie. Przyrząd ten (fig. 58, str. 87) składa się z dwukolanowej rury, wypełnionej rtęcią, która w początku doświadczenia stoi w obu kolanach na jednakowej wysokości. Jedno kolano (na figurze—lewe) zakończone jest w górnej swej części metalową oprawą, opatrzoną z boku kranem; do kolana tego można doszrubowywać którekolwiek z naczyń, mających rozmaity kształt, lecz jednakowo wielki dolny otwór. Nalejmy do przyszrubowanego naczynia wody do pewnej wysokości, wskazanej przez ostrze sztyfcika, wtedy ciecz ta, cisnąc na górną powierzchnię rtęci, odgrywającej tu rolę dna

względem wody, podniesie ją w drugiem kolanie na pewną ilość podziałek. Wysokość podniesionego słupa rtęci daje nam miarę wielkości ciśnienia, wywieranego przez wodę na dno. Otóż wysokość ta będzie jednakową, niezależnie od tego, czy opisane doświadczenie wykonamy z naczyniem rozszerzonem ku górze (jak to pokazuje figura), czy z walcowatem, lub nareszcie z takiem, które zwęża się ku górze, jeżeli tylko woda będzie sięgała w nich do tej samej wysokości, t. j. do dolnego końca sztyfcika.

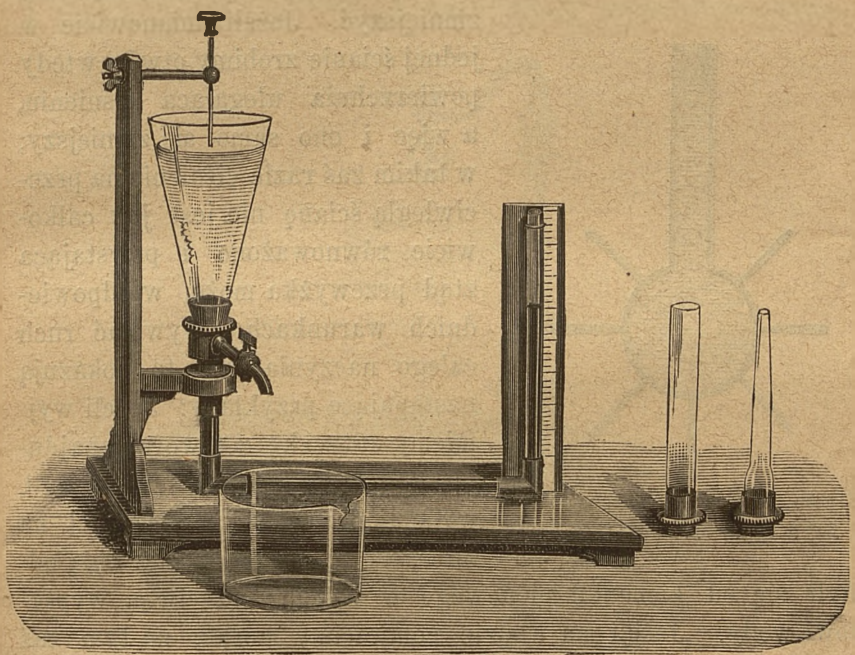


Fig. 58. Ciśnienie cieczy na dno, wykazane za pomocą przyrządu Haldat'a.

Ciśnienie, wywierane przez górne warstwy cieczy, rozpościera się nie tylko na wewnętrzne jej części i na dno naczynia, lecz także i na boczne jego ściany; kierunek tego *bocznego ciśnienia* jest przytem w każdem miejscu prostopadły do powierzchni ściany. Najłatwiej to wykazać za pomocą rurki, zakończonej pustą metalową kulą, w wielu miejscach posiadającą bardzo wązkie otwory. Jeżeli do takiej rury nalejemy wody, będzie ona wytryskiwała przez otwory w kierunku promieni kuli, a więc w kie-

runkach prostopadłych do jej powierzchni (fig. 59). Drogą rachunku daje się wykazać, że *ciśnienie boczne równa się ciężarowi słupa cieczy, którego podstawą jest rozważana część ściany podlegającej ciśnieniu, a którego wysokość równa się odległości środka ciężkości tej części ściany od poziomu cieczy.*

W zwykłych warunkach boczne ciśnienie w niczem się nie przejawia dlatego, że ciśnienie na jednę ścianę znosi się z równem ciśnieniem na ścianę przeciwległą; chcąc zaś boczne ciśnienie uwidocznić, należy je z jednej strony usunąć, albo przynajmniej zmniejszyć. Jeżeli mianowicie w jednej ścianie zrobimy otwór, wtedy powierzchnia ulegająca ciśnieniu, a więc i ono samo się zmniejszy; w takim zaś razie ciśnienie na przeciwległą ścianę nie jest już całkowicie równoważone i powstająca ztąd przewyżka może, w odpowiednich warunkach, wywołać ruch całego naczynia, jak to pokazują następujące przykłady: Jeżeli wyjmiemy zatyczkę z otworu, znajdującego się w bocznej ścianie kuli, wypełnionej wodą i zawieszonej na nitce, ta ostatnia wraz z kulą odchyli się od kierunku pionowego w stronę, przeciwną wypływowi wody. Jeżeli na wodzie pomieścimy korek, na tym zaś ustawimy naczynie z wodą, zaopatrzone w boczną rurkę, wtedy cały cały ten przyrząd pozostanie w spoczynku, dopóki rurka będzie zamkniętą; po otworzeniu jej natomiast, popłynie on w stronę, przeciwną kierunkowi wypływającej z rurki wody. Na tej samej zasadzie polega t. zw. koło wodne Segner'a. Składa się ono z naczynia, mogącego się obracać około pionowej osi i połączonego w dolnej swej części z poziomą rurką, zgiętą na końcach w kształcie litery S i z obu stron otwartą (fig. 60, str. 89). Jeżeli, zamknąwszy rurkę zatyczkami, nalejemy do naczynia wody i następnie wyjmiemy zatyczki, wtedy będzie się ono obracało w kierunku, przeciwnym wypływowi cieczy.

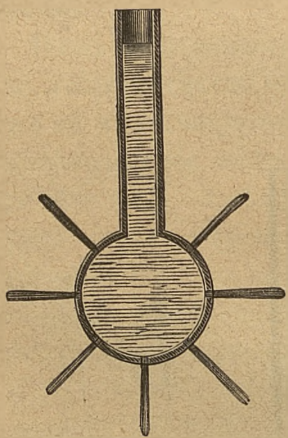


Fig. 59. Kierunek bocznego ciśnienia jest prostopadły do ścian naczynia.

W początku 2 § niniejszego rozdziału pokazaliśmy, że równowaga cieczy następuje tylko wtedy, gdy ciśnienia, działające na jakąś jej warstwę z dwóch stron przeciwległych, są równe. Z tego wynika, że każda warstewka we wnętrzu cieczy i każdy zanurzony w niej bardzo cienki przedmiot doznają jednakowego ciśnienia z góry na dół i z dołu do góry. Chcąc uwidocznić to ostatnie, należy (podobnie jak to uczyniliśmy przy ciśnieniu bocznem) ciśnienie ze strony przeciwległej usunąć, albo przynajmniej zmniejszyć; możemy zaś to zrobić w następujący naprzykład sposób:

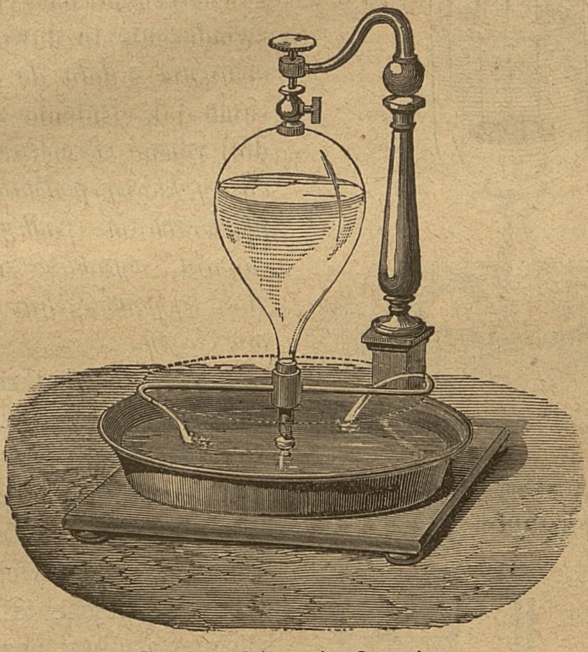


Fig. 60. Koło wodne Segner'a.

Weźmy szklaną albo inną jakąś rurę i, zamknąwszy ją od dołu krążkiem, uczepionym do nici przesuniętej przez środek rury, wprowadźmy w naczynie, napełnione wodą. Krążek, pomimo iż puszczamy nić, nie spada (fig. 61, str. 90), co pokazuje, że działa nań z dołu do góry ciśnienie, równoważące albo nawet przewyższające jego ciężar.

Jeżeli teraz będziemy nalewali wody w rurę, ciecz ta będzie także cisnęła na krążek z góry na dół, gdy zaś dojdzie ona wę-

wnątrz rury do tej samej prawie wysokości, co i zewnątrz, wtedy krążek odpadnie. Im głębiej zanurzymy rurę, tem więcej będzie można nalać w nią wody, zanim krążek odpadnie, a więc im głębiej, tem ciśnienie z dołu do góry jest większem. I gdyby krążek był nieważki, wtedy, niezależnie od tego, jak głęboko zanurzylibyśmy rurę, możnaby zawsze było nalać w nią tyle wody, że stałaby ona dokładnie na tym samym poziomie, co i w zewnętrznem naczyniu. Doświadczenie to dowodzi, że i *ciśnienie z dołu do góry* (tak samo jak ciśnienie z góry na dół) *równa się ciężarowi słupa cieczy, którego podstawę stanowi powierzchnia podlegająca ciśnieniu, wysokość zaś — odległość tej powierzchni od poziomu cieczy.*

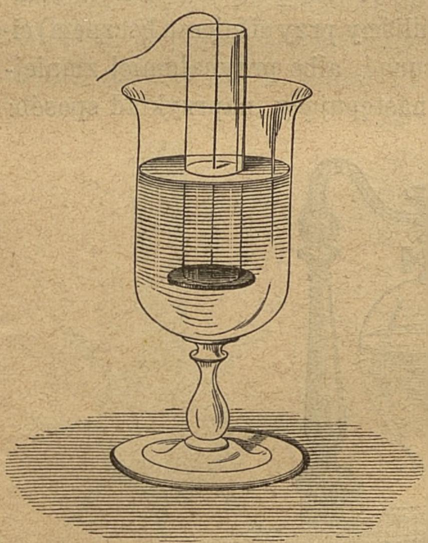


Fig. 61. Ciśnienie cieczy z dołu do góry.

Wyżej doświadczalnie wykazaliśmy, że, przy równej powierzchni dna i równej wysokości cieczy, ciśnienie na dno jest jednakowem dla naczyń najrozmaitszych kształtów, zawierających bardzo różne ilości cieczy. Fakt ten, jakkolwiek stwierdzony eksperymentalnie w sposób niewątpliwy, pozornie jednak jest niezrozumiałym; nieprawdopodobną zwłaszcza wydaje się nam okoliczność, aby ilości cieczy, które, będąc pomieszczone na wadze, wykazują różny ciężar, wywierały na dno naczynia jednakowe ciśnienie (fig. 62).



Fig 62. Paradoks hydrostatyczny.

Otóż teraz łatwo nam będzie fakt ten—nazwany, dla pozornego jego nieprawdopodobieństwa, *paradoksem hydrostatycznym* —

wytłómaczyć, jeżeli tylko uwzględnimy ciśnienie boczne, będące, jak widzieliśmy, prostopadłem do powierzchni ścian i ciśnienie z dołu do góry: W zwężającem się ku górze naczyniu (na fig. 62 środkowe) poziome ściany doznają ciśnienia w kierunku, wręcz przeciwnym kierunkowi działania ciężkości (jak to pokazują strzałki) i równającego się ciężarowi słupów cieczy, których brak jeszcze do uzupełnienia słupa, cisnącego na dno. Wskutek tego ciśnienia na poziome ściany, przeciwdziałającego ciężkości, ciecz, zawarta w tem naczyniu, będąc pomieszczona na wadze, wykaże ciężar mniejszy, niż ciśnienie na dno. Przeciwnie w naczyniu, rozszerzającem się ku górze, pochyłe ściany podtrzymują ciężar masy cieczy, leżącej na zewnątrz słupa, cisnącego na dno. Gdy więc naczynie to pomieścimy na szalce wagi, ciśnienie na pochyłe ściany, przenosząc się przez dolną powierzchnię dna na szalkę, działa na nią z siłą, równą różnicy między ciężarem całej cieczy i ciężarem walcowatego słupa, cisnącego na dno; o tyle też ciężar całej cieczy okaże się na wadze większym, niż ciśnienie na dno.

Z powyższego wynika, że można wywołać nadzwyczaj silne ciśnienie małą ilością cieczy, pomieszczając ją w bardzo wysokiem i wązkiem naczyniu, mającem obszerną podstawę, jak to za pomocą nader ciekawego doświadczenia po raz pierwszy pokazał Pascal: Wstawiwszy do beczki szczelnie przystającą wązką i bardzo długą rurę i wypełniwszy je wodą, rozsadził przez to beczkę (fig. 63, str. 92), co nie powinno nas dziwić, jeżeli rozważymy, że na ścianach jej ciążył słup cieczy, którego podstawa równała się powierzchni beczki, wysokość zaś była nieco większą od długości rury. Pojmiemy teraz, że 1 kilogramem wody możemy wywierać ciśnienie, równe ciężarowi tysięcy kilogramów.

§ 4. Prawo naczyń połączonych i jego zastosowania. Równowaga cieczy, nie mięszających się z sobą. Libella.

Nalejmy jednej i tej samej cieczy, naprzykład wody, do dwóch lub więcej naczyń, połączonych ze sobą u dołu kanałem, albo mających wspólne dno, a zobaczymy, że w każdem z tych naczyń woda dojdzie do tej samej wysokości, czyli innemi słowy,

we wszystkich stanie na tym samym poziomie ([1]) (fig. 64, str. 93). Wynika to wprost z nauki o bocznem ciśnieniu: każda bowiem

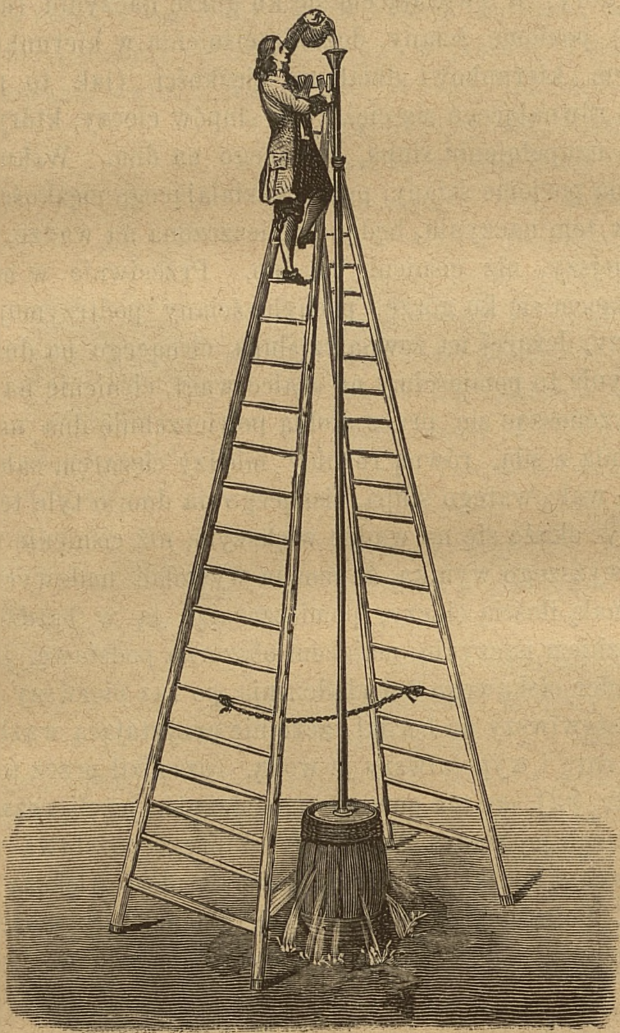


Fig. 63. Paradoks hydrostatyczny; doświadczenie Pascala.

warstewka wody, zajmująca poprzeczny przekrój dolnej, łączącej naczynia rury, tylko wtedy jest w równowadze, gdy z dwóch

([1]) Pod warunkiem, że niema pomiędzy niemi naczynia bardzo wązkiego, wtedy bowiem rzecz się zmienia, jak to zobaczymy w nauce o włoskowatości.

stron przeciwległych cisną na nią słupy cieczy jednakowej wysokości.

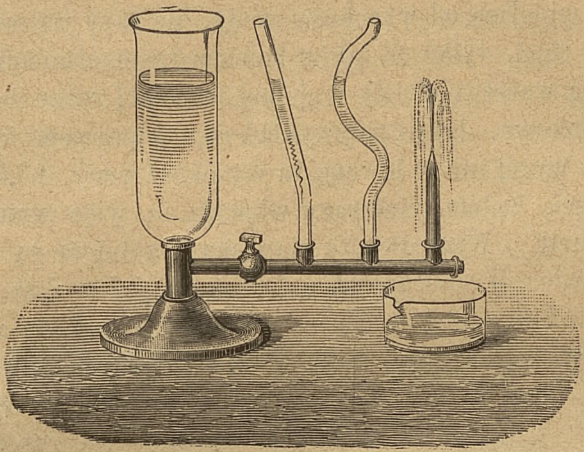


Fig. 64. Jednakowy poziom tej samej cieczy w naczyniach połączonych.

Jeżeli natomiast w połączonych naczyniach znajdują się dwie ciecze o rozmaitym ciężarze właściwym, to wysokości ich będą

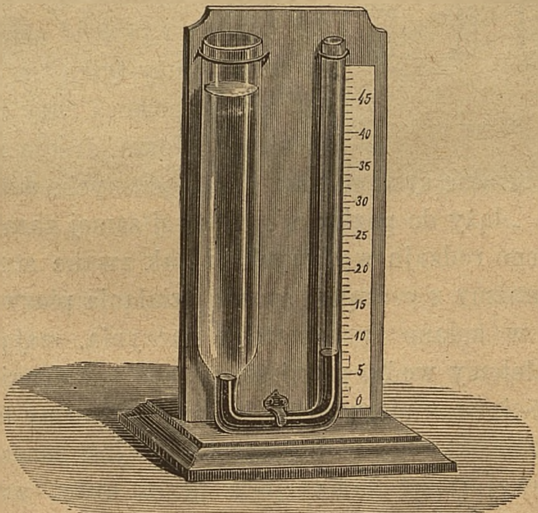


Fig. 65. Dwie różne ciecze w naczyniach połączonych.

różne. Nalejmy trochę rtęci do dwukolanowego naczynia (fig. 65), ciecz ta będzie dochodziła w obu kolanach do jednakowej wyso-

kości; jeżeli dolejemy następnie do lewej rury wody, rtęć, pod wpływem jej ciśnienia podniesie się w prawej rurze na wysokość, tyle razy mniejszą od wysokości wody, ile razy ta ostatnia jest lżejszą od rtęci, tylko w takim bowiem razie ciśnienie na każdą poprzeczną warstwę cieczy w dolnej wspólnej rurze będzie z obu stron jednakowe. Jeżeli naprzykład rtęć w prawem kolanie stoi o 3 milim. wyżej niż w lewem, to wysokość wody, 13,5 razy lżejszej od rtęci, będzie tyleż razy większą, a więc wynosić będzie 40,5 milimetr. Wszystkie te zjawiska uogólnione są w następującem prawie: *W naczyniach połączonych jedna i ta sama ciecz sięga w każdem z nich do równej wysokości, wysokości zaś różnych cieczy są odwrotnie proporcyonalne do ich ciężarów właściwych.*

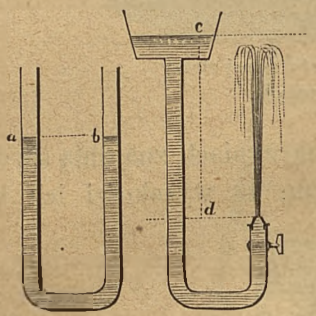


Fig. 66. Szemat wodotrysku.

Prawo naczyń połączonych, zwłaszcza zaś pierwsza jego część, znajduje bardzo liczne zastosowania. Gdy naprzykład w jakimś wysoko położonym punkcie znajduje się zbiornik wody, wtedy łatwo ją sprowadzić do każdego miejsca, leżącego nie wyżej od zbiornika; w tym celu należy tylko ten ostatni połączyć za pomoca rury z danem miejscem. Morza, źródła i rzeki przedstawiają naturalne systemy naczyń połączonych, w których woda bezustannie „dąży do poziomu". Na tej samej zasadzie polegają także pewnego rodzaju wodotryski i tak zwane studnie artezyjskie. Rozważmy z początku sposób działania pierwszych:

Jeżeli w kolano rurkowatego naczynia, mającego kształt litery U, nalejemy wody, podniesie się ona i w drugiem do tej samej wysokości, co w pierwszem (fig. 66). Weźmy teraz inne podobne naczynie, którego atoli jedno kolano jest znacznie krótszem i w górnej swej części zamkniętem przez kran; woda ciśnie na ten ostatni z dołu do góry z siłą, równą ciężarowi nadmiarowego słupa cieczy *c d*, a po odkręceniu krana swobodnie wytryskiwać będzie w górę. Podniosłaby się ona przytem dokładnie do wysokości poziomu wody (*c*) w drugiej rurze, gdyby nie przeszkody,

jakie napotyka w tarciu o ścianki otworu, przez który wytryskuje, dalej w oporze powietrza i w kroplach opadających, które przeszkadzają innym wznosić się do góry. Tę ostatnią zawadę możnaby usunąć, nadając krótszej rurze, zamiast pionowego, kierunek nieco pochyły Wymienione przeszkody sprawiają, że strumień wytryskującej wody jest o wiele niższym od poziomu cieczy w *c*, będzie on jednak zawsze sięgał do jednakowej wysokości, dopóki poziom wody w zbiorniku się nie obniży. Chcąc więc, ażeby wodotrysk przez dłuższy czas bił z jednakową mocą, należy go zasilać wodą z bardzo obszernego zbiornika, co najlepiej

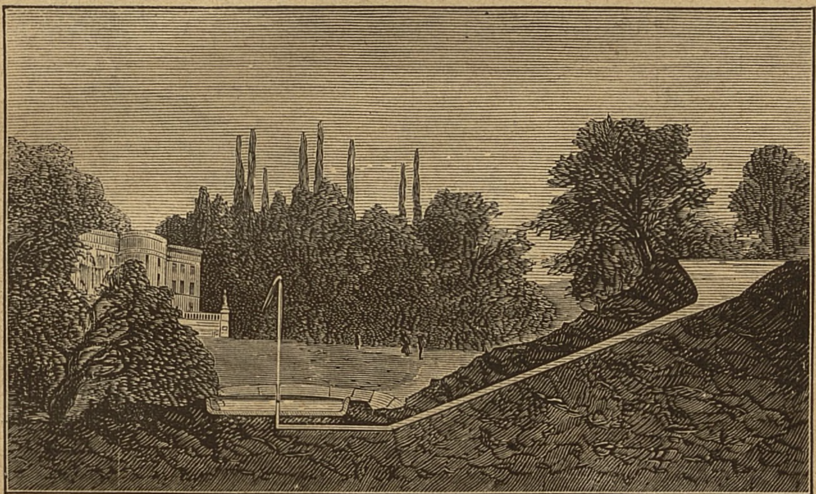


Fig. 67. Wodotrysk.

zostaje uskutecznione przez stały dopływ wody z jakiegoś wysoko położonego miejsca (fig. 67). Jeden z największych wodotrysków tego rodzaju znajduje się w parku, leżącym na wzgórzu Wilhelma (Wilhelmshöhe) przy Kassel: strumień jego ma około $^1/_2$ metra w średnicy i może sięgać do wysokości przeszło 60 metrów.

Przejdźmy teraz do studzien artezyjskich, nazwanych tak od starej prowincyi francuzkiej Artois, gdzie znajdują się w znacznej ilości i gdzie można napotkać takie, które, jak się zdaje, sięgają końca XII wieku. W epoce o wiele odleglejszej umiano już urządzać studnie tego rodzaju w Chinach i w Egipcie. Są to

pionowe wązkie przekopy w ziemi, dochodzące niekiedy do bardzo znacznej głębokości i łączące powierzchnię z jakąś podziemną warstwą, bogatą w wodę. Dla zrozumienia ich działania wypada nadmienić, że z warstw składających skorupę ziemską, jedne, jak naprzykład piaski, są przesiąkliwe dla wody, inne zaś, jak gliny, jej nie przepuszczają. Zauważywszy to, przypuśćmy, że w pewnej głębokości pod kotliną *H* (fig. 68) znajdują się dwie warstwy *A B* i *C D* nieprzesiąkliwe, oddzielone od siebie przesiąkliwą warstwą *K K*, rozpościerającą się na znacznej przestrzeni i dochodzącą aż do wysoko położonego miejsca na powierzchni ziemi między *A* i *C*. Woda deszczowa, przesiąkając do wnętrza, spływa po naturalnej pochyłości gruntu, zbiera się w warstwie *K K*

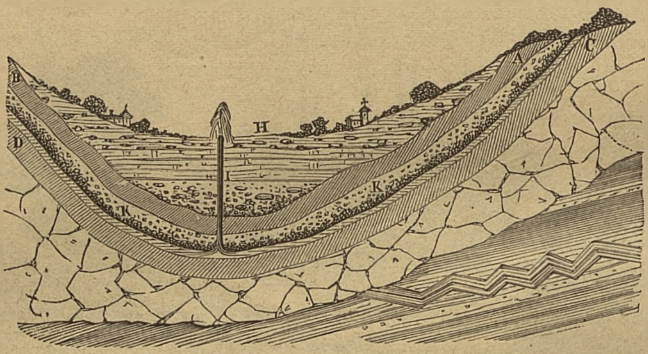


Fig. 68. Studnia artezyjska.

na całej jej długości i nagromadza pod kotliną; nie może ona atoli przedostać się do jej powierzchni dlatego, że przedziela ją od niej nieprzesiąkliwa warstwa *A B*. Jeżeli zaś w *H* wywiercimy pionowy otwór *I*, przecinający tę warstwę i sięgający aż do *K K*, otrzymamy system naczyń połączonych i woda, podnosząc się, będzie wytryskiwała przez otwór do wysokości tem większej, im wyżej położoną jest miejscowość między *A* i *C*.

Woda, zasilająca studnię artezyjską, dopływa niekiedy z odległości 20 do 30 mil i zbiera się w głębokości kilkudziesięciu lub kilkuset metrów pod powierzchnią ziemi, zależnie od mniejszej lub większej pochyłości warstwy przesiąkliwej. Studnia artezyjska w Passy jest głęboką na 587,5 metr., a wytryskująca

KSIĘGARNIA NAKŁADOWA

H. OLAWSKIEGO

Mazowiecka Nr. 6,

POLECA:

HISTORYĘ NATURALNĄ

D-ra G. Hayeka,

zawierającą 72 tablic zoologicznych z 845 kolorowanemi figurami, 40 tablic botanicznych z 445 kolorowanemi figurami i 8 mineralogicznych z 75 figurami. — Cena kompletu Rs. **18**; w ozdobnej oprawie Rs. **22**.

Także do nabycia (tak długo jak zapas starczy)

w 30-tu zeszytach po kopiejek **60**.

Autorowi dzieła *przyznano* na wystawie w Tryeście w r. 1882 **złoty medal** w dziale sztuk i nauk.

HISTORYĘ POWSZECHNĄ

BECKERA,

w przekładzie dopełnionym i uzupełnionym

w epoce dziejów najnowszych,

pod redakcyą **M. Wołowskiego**, w 12 tomach po Rs. **1** kop. **10** za tom (oprawne tomy zawierające po 2 tomy po Rs. **2** kop. **50**) lub w zeszytach po kop. **10**.

GEOGRAFJĘ POPULARNĄ

czyli

Ziemia w malowniczych obrazach.

Opisy najciekawszych krajów, ludów i miejscowości według najnowszych źródeł i najcelniejszych autorów, opracował

Dr. Wł. Wicherkiewicz,

z mapkami i drzeworytami, w 53-ch zeszytach po kop **15**.

Podręczniki do nauki języków obcych

(Z WYMOWĄ)

podług metody **D-ra H. Loewego.**

JĘZYK FRANCUZKI

ze słownikiem

francuzko-polskim i polsko-francuzkim,

komplet w 25 zeszytach

po 15 kop.

JĘZYK NIEMIECKI

(pod prasą)

ze słownikiem

polsko-niemieckim i niemiecko-polskim,

komplet w 25 zeszytach

po 15 kop.

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

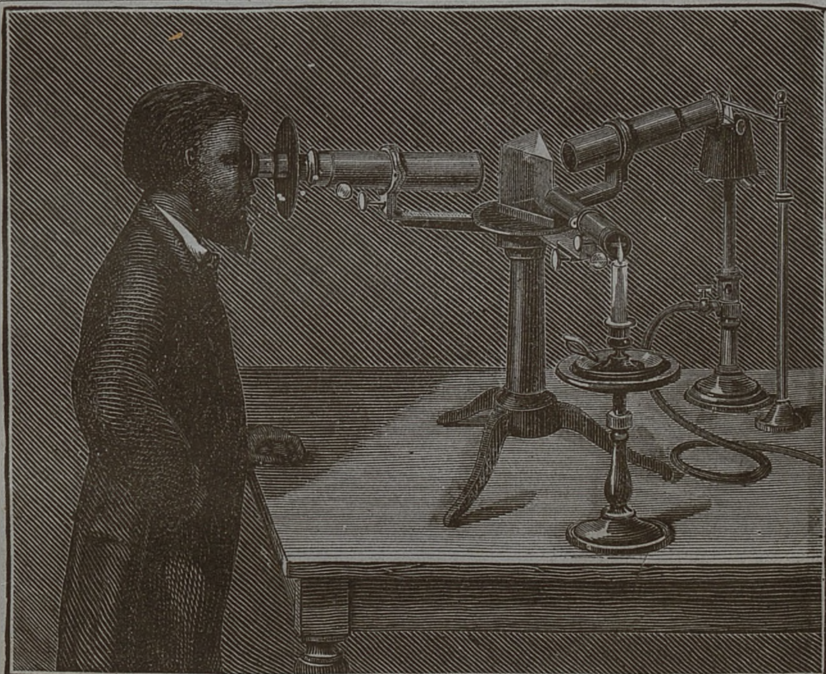
Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop. | **Zeszyt 4.** | Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego,** ul. Mazowiecka № 6.

1889.



Tabl. III. **Kształt kryształów śniegu** według **Scoresby'ego.**

Дозв. Ценз. Варшава, 9 Марта 1899 г. Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

z niej woda, jako pochodząca z tak znacznej głębi, posiada względnie wysoką temperaturę 28° C.

Na zasadzie naczyń połączonych polega także często używany, acz nie bardzo dokładny przyrząd niwelacyjny, zwany *równowagą wodną*, pozwalający oznaczać wyniesienie danego punktu pewnej miejscowości nad innym. Składa się on z długiej rurki, blaszanej lub mosiężnej, na końcach której osadzone są pod kątem prostym dwie rurki szklane *D* i *E* (fig. 69). Przy posługiwaniu się tym przyrządem, ustawia się go tak, jak pokazuje figura i nalewa doń zabarwionej wody, dopóki ta nie wypełni rzeczonych rurek mniej więcej do $^3/_4$ ich wysokości. Gdy po kilku wahaniach równowaga się ustali, powierzchnie cieczy w obu rur-

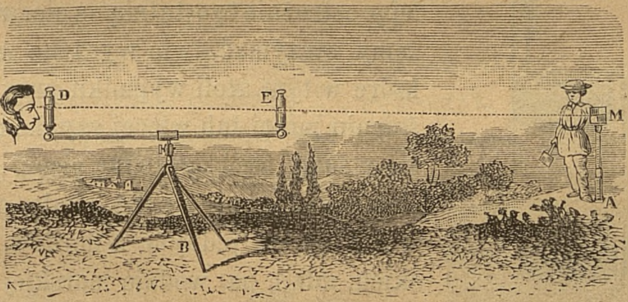


Fig. 69. Równowaga wodna.

kach będą leżały dokładnie w jednej i tej samej poziomej płaszczyznie. Przypuśćmy, że trzeba znaleźć, o ile punkt *A* leży wyżej albo niżej od innego jakiegoś punktu. W tym celu naprzeciw równowagi wodnej ustawia się w *A* pionowo pręt z naciętą na nim skalą; wzdłuż pręta daje się przesuwać deszczułka *M*, ułożona z 4 kwadratów, naprzemian białych i czarnych. Obserwator, patrząc na pręt wzdłuż linii poziomej *D E*, stycznej do powierzchni cieczy w obu rurkach, daje znak swemu pomocnikowi, aby przesuwał w górę lub na dół deszczułkę, dopóki środek jej, w którym schodzą się wszystkie 4 kwadraty, nie znajdzie się dokładnie na przedłużeniu linii *D E*. Następnie, skierowawszy w odpowiedni sposób równowagę wodną, powtarza się to samo względem owego drugiego punktu. Odczytana na skali różnica w po-

łożeniu deszczułki na pręcie, ustawianym kolejno w obu punktach, pokazuje wyniesienie jednego z nich nad drugim.

Na zakończenie niniejszego rozdziału, rozważmy jeszcze równowagę kilku cieczy, nie mięszających się z sobą. Nalejmy w słój rtęci, wody i oliwy; ciecze te ułożą się według swych gęstości: najcięższa z nich—rtęć zbierze się na spodzie, nad nią będzie się znajdowała woda, tę ostatnią zaś pokryje warstwa oliwy (fig. 70). Przytem graniczne powierzchnie tych cieczy będą poziomemi płaszczyznami—jak gdyby w słoju znajdowała się jedna tylko ciecz—jeżeli pominiemy tu wpływ ścian naczynia, o czem później będzie mowa. Gdy mamy dwie ciecze różnej gęstości, mięszające się z sobą, jak np. roztwór soli i czystą wodę, to i wtedy, lejąc ostrożnie tę ostatnią na pierwszą, możemy otrzymać dwie wyraźne warstwy, które w tym atoli wypadku przy wstrząśnieniu mniej lub więcej szybko mięszają się z sobą, tworząc jednę ciecz. Zjawisko podobne na wielką skalę obserwował Vogt w jednym z fiordów norweżskich, gdzie na wodzie morskiej,—z powodu zawartości soli cięższej, aniżeli woda rzeczna — spoczywała warstwa słodkiej (t. j. rzecznej) wody na 1,3 metr. gruba. Podobnie i na dnie Tamizy, w dosyć znacznej odległości od ujścia, znaleziono warstwę słonej wody, ustawicznie wznawianej przez przypływ morza. Rozumie się, że zjawiska tego rodzaju mogą zachodzić tylko w razie, gdy wody są bardzo spokojne, najlżejsze zaś wzburzenie morza szybko powoduje zmięszanie się wody słodkiej ze słoną.

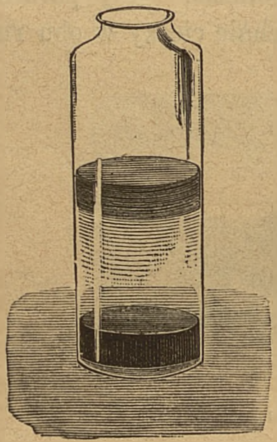


Fig. 70. Równowaga kilku cieczy różnej gęstości, nie mięszających się z sobą.

To, cośmy wyżej powiedzieli o równowadze cieczy, nie mięszających się z sobą, stosuje się także do wypadku, gdy mamy ciecz i gaz: ten ostatni, jako lżejszy, zajmuje najwyższą część zawierającego je naczynia. Na tej zasadzie polega tak zwana *libella*, służąca do poziomego ustawiania różnych części wielu przyrzą-

dów fizycznych. Składa się ona z lekko wypuklonej ku górze i zakrzywionej nieco na obu końcach szklanej rurki *A B* (fig. 71), prawie całkowicie wypełnionej wodą, albo lepiej alkoholem lub eterem tak, że pozostaje w niej tylko mały pęcherzyk powietrza, dążący do zajęcia najwyższego miejsca. Po wypełnieniu rurki cieczą i zalutowaniu obu końców, zamyka się ją w miedzianym futerale *C D*, otwartym u góry (jak to pokazuje fig. 72) i przymocowanym do starannie polerowanej płyty metalowej. Z całej rurki szklanej środek jej jest najbardziej oddalony od płyty metalowej tak, że gdy pomieścimy libellę na płaszczyznie poziomej *P*, pęcherzyk powietrza *M* zatrzyma się dokładnie pomiędzy dwoma punktami, jednakowo odległemi od środka skali, naciętej na rurze. Przy słabem nachyleniu badanej płaszczyzny, pęcherzyk *M* nie będzie się znajdował

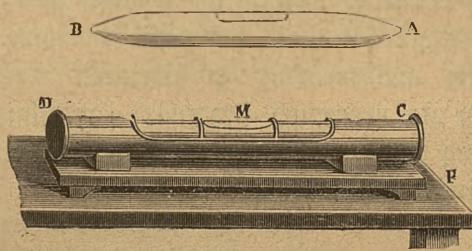
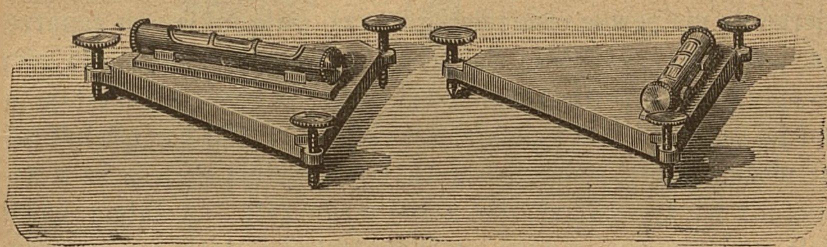


Fig. 71 i 72. Libella.


Fig. 73. Poziome ustawianie płaszczyzny za pomocą libelli.

dokładnie w środku rurki, lecz będzie sięgał z jednej strony do dalszej podziałki, niż z z drugiej; przy większem zaś nachyleniu płaszczyzny zajmie on jeden z końców rurki i skryje się pod futerałem.

Przypuśćmy, iż chcemy nadać jakiejś starannie wygladzonej płycie trójkątnej położenie dokładnie poziome; w tym celu przedewszystkiem zaopatrujemy ją w szrubki — dopasowane do

otworów, znajdujących się na jej rogach—które, za wkręcaniem lub wykręcaniem, zlekka podnoszą lub obniżają odpowiedni róg płyty. Libellę ustawiamy z początku wzdłuż którejkolwiek krawędzi i obracamy jednę ze szrubek, znajdujących się na jej końcach, dopóki pęcherzyk powietrza nie zajmie środkowego położenia w rurce; nastąpi to, według powyższego, wtedy, gdy dana krawędź przyjmie położenie poziome (fig. 73). Następnie libellę umieszczamy w kierunku wysokości trójkąta, prostopadłej do rzeczonej krawędzi i regulujemy położenie płyty za pomocą trzeciej szrubki, dopóki pęcherzyk powietrza znowu nie zajmie środka libelli.

ROZDZIAŁ VI.

Równowaga ciał, zanurzonych w cieczy.

§ 1. Parcie cieczy z dołu do góry. Prawo Archimedesa. Pływanie.

Wiemy wszyscy, że chcąc utrzymać pod wodą jakieś lżejsze od niej ciało, naprzykład korek lub kawałek drzewa, należy wywierać na nie pewne ciśnienie; gdy zaś ciała takie, po zanurzeniu, puszczamy, podnoszą się one w kierunku pionowym do góry i wypływają na powierzchnię cieczy, tak że część ich wystaje po nad jej poziom. Ale i ciała cięższe od wody, jak kamień lub metal, można łatwiej podnosić w górę, gdy znajdują się jeszcze w wodzie, niż wtedy, gdy się już z niej wynurzyły. A zatem każde ciało, zanurzone w wodzie, staje się lżejszem, traci coś ze swego ciężaru i jest podtrzymywane przez jakąś siłę, pomagającą nam dźwigać je do góry. Znane te powszechnie zjawiska znajdują wyjaśnienie w omówionem już w poprzednim rozdziale ciśnieniu cieczy z dołu do góry, którego istnienie wykazaliśmy za pomocą doświadczenia, przedstawionego na fig. 61, str. 90. Tamże powiedzieliśmy, że każdy przedmiot, na tyle cienki, że grubość jego możemy pominąć, będąc zanurzony w cieczy, doznaje w niej *jednakowego* ciśnienia z dołu do góry i w kierunku przeciwnym. Inaczej się dzieje, gdy zanurzone ciało—niechaj to będzie walec

metalowy—posiada pewną grubość, albo lepiej wysokość: rzeczone ciśnienia nie są wtedy równe. Ciśnienie bowiem, wywierane na walec przez ciecz z dołu do góry, równa się ciężarowi słupa cieczy, którego podstawą jest dolna powierzchnia walca, wysokością zaś—odległość jej od poziomu cieczy; natomiast ciśnienie z góry na dół równa się ciężarowi słupa cieczy, mającego tę samą podstawę, lecz niższego, niż tamten o wysokość walca. Mamy więc tu nadmiar pierwszego ciśnienia nad drugiem, równy

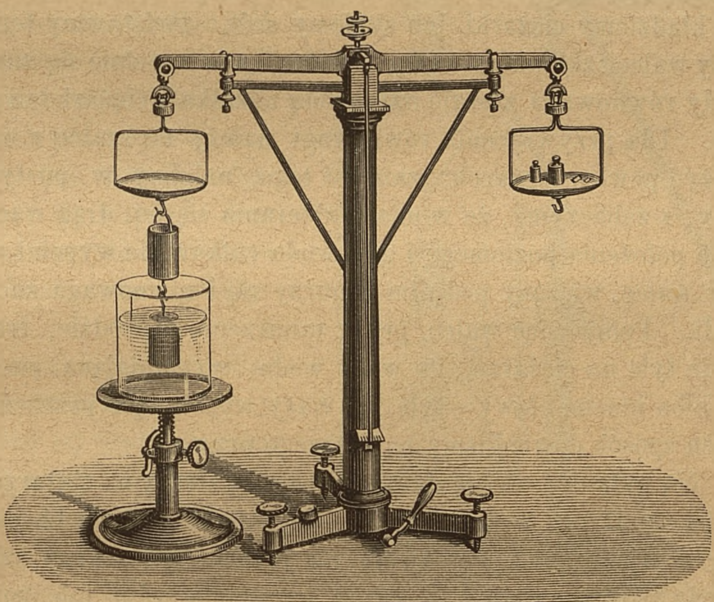


Fig. 74. Doświadczalny dowód prawa Archimedesa.

ciężarowi słupa cieczy, wypchniętego przez walec; ten nadmiar ciśnienia z dołu, a więc w kierunku przeciwnym kierunkowi działania ciężkości, podtrzymuje walec i czyni go o tyle lżejszym, ile waży równa objętość cieczy. Rozumowanie to stosuje się do wszelkich ciał, zanurzonych w jakiejkolwiek cieczy. W ten sposób dochodzimy do następującego prawa, odkrytego około 200 r. przed Nar. Chr. przez jednego z najznakomitszych matematyków i fizyków wszystkich czasów—Archimedesa:

Każde ciało, zanurzone w cieczy, traci pozornie tyle ze swego ciężaru, ile waży wypchnięta przez nie ciecz, albo innemi słowy—ile waży taką samą objętość cieczy.

Prawo to możemy sprawdzić za pomocą następującego doświadczenia. Weźmy dwa jednakowo wielkie walce metalowe: jeden pełny, drugi zaś pusty, mający więc postać wiaderka, tak, że pierwszy szczelnie go wypełnia i mieści się w nim jakby w futerale. Oba walce za pomocą przytwierdzonych do nich haczyków zawieszamy na jednej szalce wagi tak, ażeby pełny znajdował się pod wydrążonym (fig. 74, str. 101), na drugą zaś, dla zrównoważenia, kładziemy ciężarki, lub sypiemy śrót. Podstawmy teraz pod pełny walec szklankę z wodą, w którejby on zupełnie się zanurzył, wtedy równowaga zostaje naruszoną i szalka z ciężarkami się obniża. Dla przywrócenia równowagi należy na szalce z walcami położyć pewien ciężarek; zamiast tego, nalejmy w pusty walec wody, a zobaczymy, że w miarę zbierania się jej, drąg wagi wraca do położenia poziomego i gdy woda całkowicie wypełni wydrążony walec, wiszący pod nim zanurzy się i równowaga znowu się ustali. Pełny więc walec, przez zanurzenie w wodzie, traci pozornie tyle na ciężarze, ile waży woda, wypełniająca pusty walec, albo innemi słowy—tyle, ile waży wypchnięta przezeń ciecz. W ten sposób dowiedliśmy powyższego prawa.

Na pytanie—co się dzieje z pozorną stratą na ciężarze, jaką ponosi zanurzone w cieczy ciało—daje nam odpowiedź następujące doświadczenie: Postawmy na jednej szalce wagi szklankę z wodą i zrównoważmy ją przez nasypanie śrótu lub położenie ciężarków na drugą szalkę. Jeżeli następnie zanurzymy w wodzie pełny walec, przyczepiony do wiaderka takiej samej zawartości i zawieszonego z kolei na stojącym obok statywie (fig. 75, str. 103), równowaga się naruszy: szalka ze szklanką zacznie się obniżać, druga zaś podnosić; woda więc jakby zyskała coś na ciężarze wskutek zanurzenia w niej walca. Chcąc wiedzieć ile zyskała, ujmijmy ze szklanki część wody i lejmy ją do wiaderka; zobaczymy, że gdy to ostatnie całkowicie będzie napełnione wodą, równowaga znowu zostanie przywróconą. Jeżeli przeto, jakeśmy to wyżej pokazali, ciało zanurzone w cieczy pozornie

traci tyle na swym ciężarze, ile waży wypchnięta przez nie ciecz, to z drugiej strony o tyleż pozornie zwiększa się ciężar cieczy. Wszystko więc jedno, czy naprzykład położymy na szalce wagi kawalek żelaza obok szklanki z wodą, czy też umieścimy go w niej: w każdym wypadku, dla zrównoważenia, będziemy musieli jednakowo obciążyć drugą szalkę.

Prawo Archimedesa należy do najważniejszych praw przyrody, nietylko **bowiem** uogólnia ono bardzo liczne zjawiska, występujące przy zanurzaniu ciał w jakiejkolwiek cieczy, a nawet w jakimkolwiek płynie (stosuje się ono także, jak później zobaczymy, do gazów), lecz nadto dozwala rozwiązywać wiele pytań praktycznych. **Rozważmy** w tym celu kilka przykładów: Miedź jest 9 razy cięższą od wody; bryłka więc z tego metalu, ważąca dajmy na to 27 gramów, będąc zanurzona w wodzie, staje się pozornie lżejszą o 3 gr., innemi słowy traci $^1/_9$ swego ciężaru. Siarka, która jest tylko 2 razy lżejszą od wody, w tych samych warunkach traci $^1/_2$ swego ciężaru i t. d. Jednem słowem dane ciało, będąc zanurzone w wodzie, tem więcej traci na ciężarze, im jest od niej lżejszem. Znając przeto ciężar właściwy danego ciała, możemy z góry obliczyć, jaką część swej wagi straci ono w wodzie. Praktyczne zadanie podobnego rodzaju było właśnie powodem odkrycia powyżej wyłuszczonego prawa.

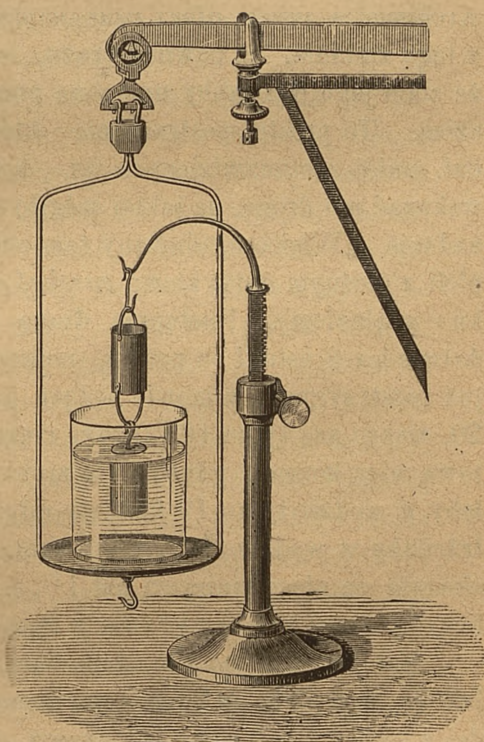


Fig. 75. Pozorne zwiększanie się ciężaru cieczy wskutek zanurzenia w niej jakiegoś ciała.

Opowiadają mianowicie, że władca greckiej osady w Syrakuzach zamówił u złotnika koronę, na którą dał mu 20 funtów złota; złotnik po pewnym czasie doręczył też koronę ważącą dokładnie 20 f. Tymczasem rozeszła się wśród ludu pogłoska, że złotnik ukrył pewną część danego mu złota, zastąpiwszy ją jednakową ilością o wiele tańszego srebra. Gdy doszło to do wiadomości rzeczonego władcy, polecił on Archimedesowi rozstrzygnąć tę kwestyę, pod warunkiem jednak, aby korony nie uszkodził. Archimedes przez długi czas napróżno usiłował wywiązać się z tego zadania, aż pewnego razu, siedząc w wannie, zauważył, że ciało jego jest jakby unoszone przez wodę, staje się jakby lżejszem. To proste spostrzeżenie—które nie zwróciłoby uwagi ludzi, mniej zastanawiających się,—było dlań wystarczającem, aby wskazać mu drogę, na jakiej mógłby rozstrzygnąć wzmiankowane zadanie. Wielce uradowany tem odkryciem, wybiegł nago z kąpieli z głośnym okrzykiem: *eureka! eureka!* (co znaczy po grecku—znalazłem). Następnie drogą rozumowania i stosownych doświadczeń ustalił on prawo, noszące jego imię i dozwalające już rozstrzygnąć w mowie będące pytanie: Ponieważ złoto jest 20, srebro zaś tylko 10 ([1]) razy cięższe od wody, dwudziestofuntowa więc korona, gdyby była zrobiona z czystego złota, ważyłaby w wodzie tylko 19 funtów, gdyby zaś była tylko ze srebra, traciłaby w wodzie 2 f. Otóż strata na ciężarze owej korony okazała się nieco mniejszą niż $1\frac{1}{4}$ f., z czego łatwo już było obliczyć, że zawiera ona prawie 5 funtów srebra.

Zanurzmy jedno i to samo ciało, kolejno w różnych cieczach, jakoto: w wodzie, w kwasie siarczanym i w bromie, wtedy w każdej z nich wypycha ono jednakową objętość cieczy, a więc strata jego na ciężarze będzie tem większą, im więcej waży objętość danej cieczy. Niechaj ciałem zanurzonem będzie naprzykład walec z platyny—metalu, 22 razy cięższego od wody; kwas siarczany jest prawie 2, brom zaś—3 razy cięższy od tejże cieczy. Strata rzeczonego walca w wodzie wynosi oczywiście $\frac{1}{22}$ jego ciężaru,

---

([1]) Bierzemy tu, dla uproszczenia rachunku, okrągłe liczby; w rzeczywistości zaś c. wł. złota równa się 19.26, a srebra—10.47.

w kwasie siarczanym—prawie $^2/_{22}$ czyli prawie $^1/_{11}$, w bromie zaś—$^3/_{22}$. Łącząc ostatnie rezultaty z temi, jakie otrzymaliśmy wyżej przy rozważaniu straty na ciężarze kilku różnych ciał, zanurzonych w tej samej cieczy, możemy wypowiedzieć następujące prawo, które stanowi prosty wynik z zasady Archimedesa: *Pozorna strata na ciężarze jednego i tego samego ciała, zanurzonego w różnych cieczach, jest wprost proporcyonalna do ich ciężarów właściwych; pozorna zaś strata na ciężarze różnych ciał o jednakowej objętości, pogrążonych w jednę i tę samą ciecz, jest odwrotnie proporcyonalna do ciężarów właściwych tych ciał.*

Zasada Archimedesa tłómaczy nam także zjawiska pływania. Wiemy już, że na każde ciało, zanurzone w cieczy, działa z dołu do góry ciśnienie, przewyższające ciśnienie w kierunku przeciwnym o wielkość, równą ciężarowi wypchniętej cieczy, z góry zaś na dół—własny jego ciężar. Otóż zależnie od stosunku dwu tych wręcz przeciwnych działań, ciało tonie, albo unosi się swobodnie we wnętrzu cieczy, albo też pływa po niej. Pierwszy wypadek ma miejsce, gdy dane ciało jest cięższem od cieczy; tak naprzykład bryłka miedziana, ważąca 9 gr., doznaje w cieczy, według poprzedniego (str. 103) ciśnienia z dołu do góry, równającego się ciężarowi 1 gr., a więc zawsze jeszcze ściąganą jest ku dołowi przez siłę, równą ciężarowi 8 gr. i dlatego spada na dno, czyli tonie. Drugi wypadek zachodzi, gdy dwa rzeczone działania są sobie równe, innemi słowy—gdy pogrążone ciało waży dokładnie tyle, ile taka sama objętość cieczy. Łącząc naprzykład w jednę całość kawałek drzewa (lżejszego od wody) z pewną ilością ciężkiego metalu, jak ołów, miedź i t. d., możemy otrzymać bryłkę, ważącą dokładnie tyle, co i równa jej objętość wody. Bryłka taka, będąc zanurzona w wodzie, swobodnie unosi się w jej wnętrzu, to jest nie spada na dół, ani też nie wznosi się do góry, lecz pozostaje w tem miejscu, w którem ją puszczamy. Nareszcie gdy ciśnienie z dołu do góry przewyższa ciężar zanurzonego ciała, albo, innemi słowy, gdy to ostatnie jest lżejsze od cieczy, ciało podnosi się i wypływa na powierzchnię. Korek jest przeszło 4 razy lżejszy od wody; jeżeli przeto zanurzymy w tej cieczy kawałek korka, ważący 1 gr., straci on w niej pozornie

przeszło 4 gr. (tyle bowiem waży równa mu objętość wody), a więc pchany będzie do góry siłą, równą ciężarowi 3 gr. i wypłynie na powierzchnię. Korek, lód, niektóre gatunki drzewa pływają po wodzie, żelazo, miedź i wiele innych metali—po rtęci; w ogóle *po danej cieczy pływają takie ciała, które są od niej lżejsze.*

Możemy atoli zdziałać, ażeby ciało z materyału, cięższego od danej cieczy, także po niej pływało; w tym celu należy tylko stosownie je wydrążyć i nadać mu dostatecznie wielką objętość: Wiemy już, że miedź jest 9 razy cięższą od wody—1 centymetr sześcienny miedzi waży 9 gr., wody zaś 1 gr.—w zwykłych przeto warunkach tonie w niej. Jeżeli jednak z kawałka blachy miedzianej, ważącego naprzykład 9 gr., sporządzimy pustą skrzynkę o objętości większej niż 9 cent. sześc., mającą dajmy na to 18 cent. sześc. i zanurzymy ją w wodzie, skrzynka wypchnie także 18 cent. sześc. cieczy, ważących 18 gr., a więc pchana będzie do góry siłą, równą ciężarowi 9 gr. i wypłynie na powierzchnię.

Ciało ludzkie jest przeciętnie o $^1/_{10}$ cięższem od równej objętości wody, tak że człowiek, ważący naprzykład 60 kilogramów, traci w wodzie tylko około $54^1/_2$ kilogr., a więc pchany jest na dół przez siłę, równą ciężarowi $5^1/_2$ kil. i poszedłby na dno, gdyby za pomocą stosownych ruchów nie umiał tego nadmiarowego, stosunkowo niewielkiego, ciężaru ($5^1/_2$ kil.) utrzymać na powierzchni. Widzimy z tego, że pływanie człowieka nie jest naturalnem, lecz sztucznem; tylko bardzo otyłe osoby pływają naturalnie, jak naprzykład pewien neapolitańczyk, który ważył 150 kilogr. i o 15 kilogr. mniej, niż równa objętość wody.

Budowa zwierząt czyni je już bardziej zdolnemi do pływania; są one przytem po największej części lżejsze od wody. Ciekawą ilustracyę tego, cośmy wyżej powiedzieli o wpływie objętości na pływanie, stanowią ryby. Posiadają one mianowicie w jamie ciała pęcherz, zwany pławnym; pęcherz ten zawiera gazy, i, wskutek odpowiednich ruchów ryby, może rozszerzać się lub kurczyć, przez co objętość jego staje się większą lub mniejszą; organ ten służy rybom do wypływania na wierzch lub zagłębiania się w wodzie. Pierwsze ma miejsce wtedy, gdy ryba

rozszerzając pęcherz, powiększa objętość swego ciała, a przez to także objętość wypchniętej wody, wskutek czego zwiększa się parcie z dołu do góry; drugie zaś następuje w wypadku przeciwnym, t. j. przy kurczeniu pęcherza.

Bardzo ciekawe doświadczenie, dotyczące wpływu objętości na pływanie, podaje Delaunay w swojej „Mechanice“. Grono winne, wrzucone do kielicha z musującem winem szampańskiem, natychmiast wskutek swego ciężaru spada na dno. Wkrótce jednak na powierzchni grona zbierają się drobne pęcherzyki kwasu węglanego, wydzielającego się z wina, które nie zmieniając prawie wcale ciężaru grona, dosyć znacznie powiększają jego objętość; przez to zwiększa się objętość wypchniętej cieczy, a więc także parcie z dołu do góry i grono, podnosząc się, wypływa na powierzchnię. Jeżeli w tej chwili nadamy mu lekkie uderzenie, pęcherzyki gazu oddzielą się od niego i grono, stawszy się mniejsze, spadnie na dno; tam znowu pokryje się pęcherzykami gazu, wskutek tego wypłynie na powierzchnię i t. d. Doświadczenie to można powtarzać dopóty, dopóki z wina wydziela się jeszcze kwas węglany.

Zasada Archimedesa tłómaczy nam także fakt, że różne ciała, pływające po cieczy, pogrążają się w nią do różnej głębokości. Ciało lekkie podnosi się mianowicie w cieczy tak długo, dopóki siły, działające na nie z dołu do góry i w kierunku przeciwnym nie stają się równe, co następuje wtedy, *gdy ciecz, wypchnięta przez zanurzoną część ciała, waży tyle, co całe ciało.* Tak naprzykład walec korkowy 4 razy lżejszy od wody, pogrąży się w tę ciecz do $1/4$ swej wysokości, omówiona wyżej skrzynka miedziana, ważąca 2 razy mniej, niż równa jej objętość wody, zanurzy się w niej do połowy i t. d. Łatwo także zrozumieć, że ciało pogrąża się w daną ciecz tem głębiej, im jest ona lżejszą i naodwrót; tak naprzykład rzeczona skrzynka zanurzy się w cieczy, dwa razy cięższej od wody, tylko do $1/4$ swej wysokości, walec korkowy w cieczy dwa razy lżejszej od wody—do połowy, jeden i ten sam statek—w wodzie rzecznej głębiej, niż w morskiej i t. d.

Rozważmy teraz warunki równowagi ciała, całkowicie albo częściowo zanurzonego w cieczy. Jeżeli w wodzie swobodnie

unosi się ciało, ważące dokładnie tyle, co i wypchnięta przez nie ciecz, w którem jednak masa niejednostajnie jest rozmieszczoną—niechaj to będzie naprzykład walec korkowy z przymocowanym doń guzikiem ołowianym (fig. 76)—wtedy jego środek ciężkości *g* nie zlewa się ze środkiem ciężkości wypchniętej cieczy *P*. Dla równowagi koniecznem jest, ażeby dwa te punkty leżały na tej samej linii pionowej; jeżeli przytem środek ciężkości zanurzonego ciała leży niżej od środka ciężkości wypchniętej cieczy(fig. 76, 1) – to równowaga jest stałą, w przeciwnym razie—niestałą (fig. 76, 2). W tym ostatnim bowiem wypadku ciało, wyprowadzone ze swego położenia, będzie się coraz bardziej odeń oddalało i spocznie dopiero, gdy przyjmie położenie 1. Ciało takie (w położeniu 1) zachowuje się poniekąd jak wahadło, którego punkt zawieszenia znajdowałby się w *P*.

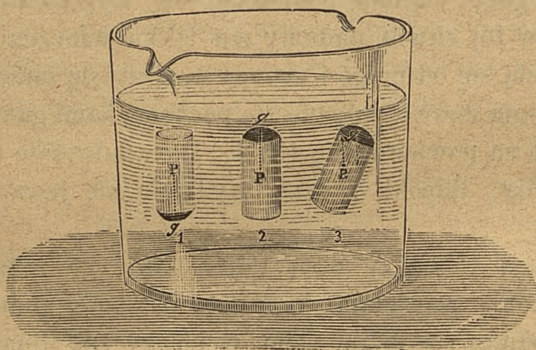


Fig. 76. Równowaga ciała, zanurzonego w cieczy tej samej co i ciało gęstości.

Gdy ciało waży mniej, niż równa objętość wody, czy to dlatego, że jest ono mniej od niej gęstem, czy też dlatego że jest wydrążone, wtedy, jak wiemy już, pływa ono po niej i pogrąża się tak długo, dopóki ciężar wody, wypchniętej przez zanurzoną jego część, nie staje się równym ciężarowi całego ciała Okręt naprzykład wraz z całym ładunkiem ważą tyle, ile objętość wody morskiej, równa objętości części okrętu, pogrążonej w wodę. I w tym razie, jeżeli równowaga ma być stałą (a jestto naturalnie koniecznem), powinien być spełniony wyżej omówiony warunek, t. j. wspólny środek ciężkości okrętu i ładunku powinien leżeć niżej od środka ciężkości wypchniętej wody. Dlatego też najcięższe towary kładzie się zwykle na sam spód okrętu, a w braku dostatecznie wielkiego ładunku, zabiera się z sobą balast, w celu obni-

żenia środka ciężkości. Lecz przy najspokojniejszem nawet morzu, statki nigdy nie znajdują się w stanie bezwzględnej równowagi, gdyż wciąż ulegają mniej lub więcej znacznym wahaniom. Należy przeto, uwzględniając ten fakt, nadać statkowi taki kształt i tak w nim rozmieścić ładunek, ażeby nawet w najgorszym wypadku parcie z dołu do góry i własny ciężar statku przyprowadzały go napowrót do stanu równowagi.

§ 2. Oznaczanie ciężaru właściwego ciał stałych i ciekłych.

Opierając się na prawie Archimedesa, możemy rozwiązać ważne praktyczne zadanie, mianowicie znaleźć ciężar właściwy różnych ciał stałych i ciekłych, a to za pomocą jednej z metod, które poniżej opiszemy.

Przedtem jednak jeszcze raz nadmienimy, że pod ciężarem właściwym danego ciała rozumieć należy stosunek bezwzględnego jego ciężaru do ciężaru równej mu objętości dystylowanej wody, mającej 4^0 Celsyusza. Trzymając się nadto francuzkiego systemu miar i wag, w którym ciężar masy dystylowanej wody rzeczonej temperatury, zawartej w jednostce objętości, stanowi jednostkę wagi—możemy także powiedzieć, że ciężar właśc. danego ciała jestto bezwzględny ciężar jednostki jego objętości. Tak naprzykład 1 cent. sześc. granitu waży 2,75 gram., a że 1 cent. sześc. wody, przy rzeczonych warunkach, waży 1 gr., przeto ciężar właściwy granitu równa się 2,75.

Jak już nadmieniliśmy na końcu IV rozdziału, *gęstością* danego ciała nazywamy stosunek jego masy do masy równej mu objętości wody; ponieważ zaś ciężary dwóch mas, oznaczone w jednem i tem samem miejscu na ziemi, są w takim samym stosunku jak te masy, liczba więc, wyrażająca ciężar wł. danego ciała, pokazuje zarazem jego gęstość.

Dla oznaczenia ciężaru wł. ciała, należy znać dwie rzeczy: bezwzględny jego ciężar i ciężar równej mu objętości wody; zamiast tego ostatniego zaś możemy także, według prawa Archimedesa, wziąć stratę na ciężarze, jaką ponosi dane ciało, gdy jest

zupełnie zanurzone w wodzie. Liczba, wyrażająca ciężar bezwzględny ciała, podzielona przez liczbę, pokazującą tę stratę, daje nam jego ciężar właściwy. Gdy chodzi o ciała stałe, postępujemy przytem według jednej z następujących metod:

Najprostszy sposób, prowadzący do celu, polega na bezpośredniem ważeniu za pomocą wagi, której jedna krótka szalka zaopatrzona jest w haczyk, służący do zawieszania na nim badanych ciał. Weźmy naprzykład kawałek żelaza i uwiązawszy go na bardzo delikatnej nitce, zawieśmy ją na haczyku jednej szalki, na drugą zaś, dla zrównoważenia, kładźmy ciężarki. Niechaj te ważą 246,5 gr., takim więc będzie bezwzględny ciężar danego kawałka żelaza. Podstawmy teraz pod nim naczynie z wodą tak, ażeby zupełnie się w niej zanurzył, wtedy krótka szalka podniesie się, druga zaś obniży; dla przywrócenia równowagi, na krótką szalkę trzeba będzie położyć ciężarki, ważące tyle, ile wynosi strata danego kawałka żelaza w wodzie; niechaj waga ich równa się 31,65 gram. Dzieląc 246,5 przez 31,65, otrzymamy 7,788 jako ciężar właściwy, a także jako gęstość żelaza; metal ten jest 7,788 razy cięższym i zawiera tyleż razy więcej masy, niż równa objętość wody.

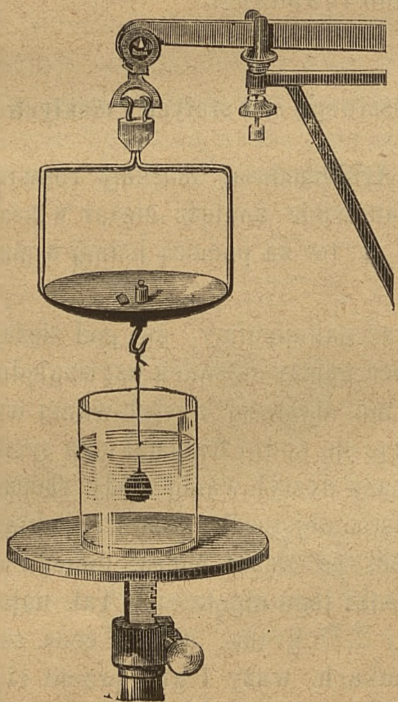


Fig. 77. Oznaczanie cięż. wł. ciał stałych. Metoda ważenia.

Przy drugiej metodzie posługujemy się aerometrem, którego urządzenie przypisują Nicholsonowi, jakkolwiek jeszcze dawniej

wynaleziony on został przez Charlesa. Przyrząd ten składa się z wydrążonego, zamkniętego z obu stron walca z mosiądzu, który wydłuża się ku górze w cienki pręcik, zakończony talerzykiem, od dołu zaś zakończony jest ciężkim metalowym koszykiem stożkowatego kształtu; środek ciężkości całego przyrządu leży bardzo nizko, tak że po wodzie pływa on w równowadze stałej. Ciężar

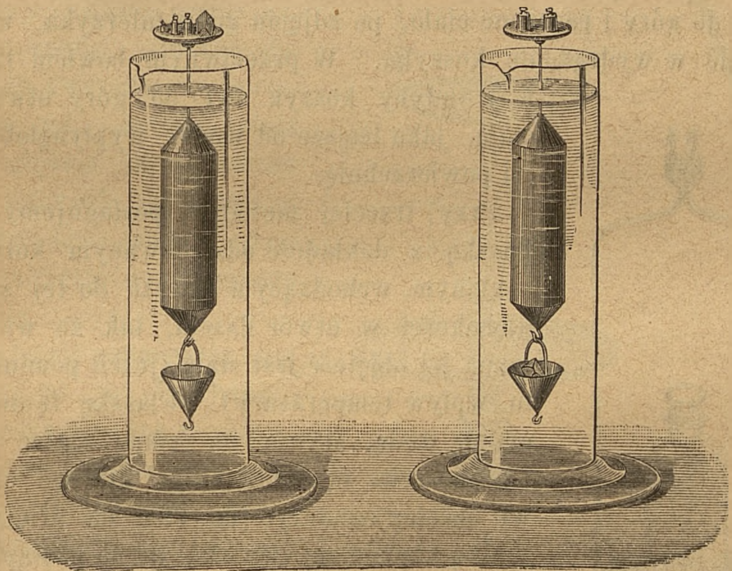


Fig. 78. Aerometr Charlesa albo Nicholsona.

aerometru jest tak dobrany, że będąc obciążony pewną ilością gwichtów,—dajmy na to 100 gr., leżących na talerzyku—zanurza się do pewnej kreski, naciętej na pręciku. Przypuśćmy, że chodzi tu o oznaczenie ciężaru właściwego siarki. W tym celu pomieszczamy kawałek tego ciała, ważący mniej niż 100 gr. na talerzyku i dokładamy tyle ciężarków, aby przyrząd zanurzył się do rzeczonej kreski (fig. 78); jeżeli trzeba dołożyć naprzykład 35,8 gr., to siarka waży tyle, ile brak do 100 gr., a więc w danym razie—64,2 gr. (Widzimy, że aerometr ten może służyć jako waga). Następnie zdejmujemy siarkę z talerzyka i kładziemy ją w koszyk, wtedy aerometr podnosi się nieco dlatego, że siarka traci część swej wagi; chcąc go zanurzyć znowu do tej

samej kreski, należy na talerzyku położyć pewną ilość ciężarków. Przypuśćmy, iż w tym celu trzeba było dodać 31 gr.—będzie to ciężar wody, wypchniętej przez siarkę, a więc ciężar wl. tej ostatniej równa się $\frac{64,2}{31}$ czyli 2,07.

Opisany przyrząd może także służyć do oznaczania ciężaru wł. ciała, lżejszego od wody; w tym celu należy tylko koszyk, znajdujący się na dolnym końcu aerometru, odwrócić wierzchołkiem do góry i rzeczone ciało, po zdjęciu go z talerzyka, wprowadzić w wydrążenie koszyka. W przeciwnym bowiem razie, t. j. gdyby koszyk był od góry otwarty, ciało, jako lżejsze od wody, wypłynęłoby na jej powierzchnię.

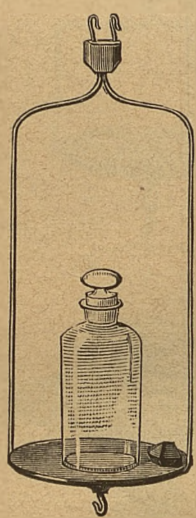


Fig 79. Flaszka z odszlifowanym korkiem, służąca do oznaczania ciężaru właściwego.

Przy trzeciej metodzie posługujemy się flaszką z dokładnie odszlifowanym korkiem szklanym, wchodzącym zawsze do tej samej głębokości w otwór flaszki, tak że wewnętrzna jej objętość jest stałą (jeżeli pominiemy tu wpływ temperatury). Flaszkę tę napełnia się wodą, stawia na jednej szalce wagi i pomieszcza obok niej ciało, którego ciężar wł. chcemy oznaczyć (fig. 79), na drugą zaś szalkę kładzie się ciężarki, aż do nastąpienia równowagi; następnie zdjąwszy flaszkę, rzuca się w nią cialo. Wtedy po nałożeniu korka, wypłynie z niej część wody, równa objętości zanurzonego ciała; usunąwszy wypłyniętą wodę i starannie otarłszy flaszkę, stawia się ją napowrót na szalce, na którą kładzie się ciężarki aż do przywrócenia równowagi. Ciężarki te pokazują nam wagę objętości wody, równej objętości badanego ciała; znając więc jego ciężar bezwzględny, mamy wszystko, co potrzebne do oznaczenia jego ciężaru wł. Dokładniejszym od opisanej flaszki jest t. zw. pyknometr—(od greckiego wyrazu: pyknos—gęsty) szklana kolbka z odszlifowanym korkiem szklanym, do którego przylutowany jest termometr, pogrążający się, przy nakładaniu korka, w ciecz, zawartą w kolbce. Używa się go zupełnie w ten sam sposób, jak wyżej.

Gdy dane ciało nasiąka wodą lub się w niej rozpuszcza, jak cukier, sól i t. d., wtedy za pomocą jednej z trzech opisanych metod oznaczamy jego ciężar wł. względem innej jakiejś cieczy, w której się nie rozpuszcza, naprzykład alkoholu lub oliwy i której ciężar wł. jest znany. Iloczyn obu liczb (wyrażających ciężar wł. danego ciała względem danej cieczy i ciężar wł. tej ostatniej względem wody), daje nam ciężar wł. badanego ciała.

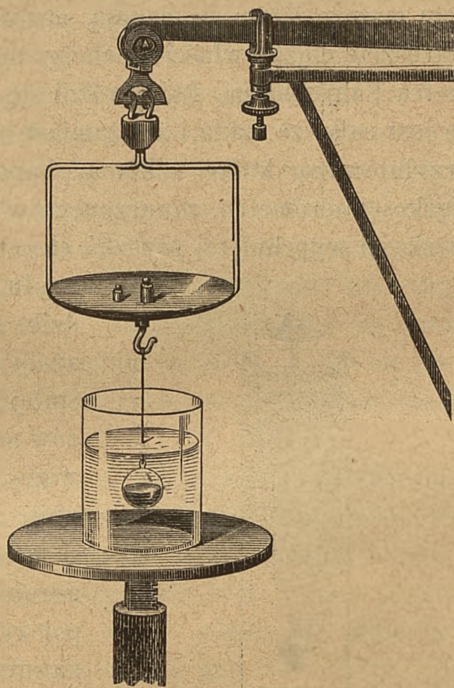


Fig. 80. Ciężar wł. cieczy, oznaczany za pomocą metody ważenia.

Jeżeli oznaczenie ciężaru wł. ma być bardzo dokładnem, jak to wymaganem jest dla celów naukowych, wtedy należy uwzględnić czystość wody, jej temperaturę, pęcherzyki powietrza, osiadające na zanurzonem w cieczy ciele, ciężar nici, na której je zawieszamy i tym podobne okoliczności.

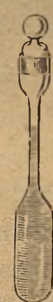
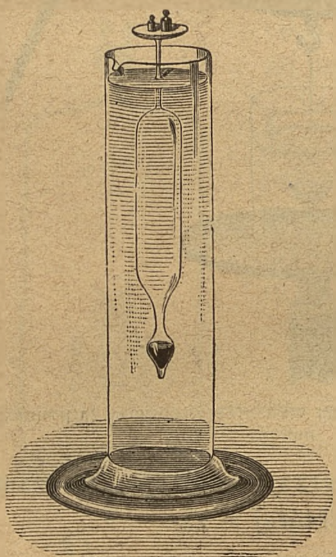


Fig. 81. Ciężar wł. cieczy. Flaszeczka z odszlifowanym korkiem.

Rozważmy teraz metody, służące do oznaczania ciężaru wł. ciał ciekłych.

Najprostszy sposób polega na oznaczeniu strat na ciężarze tego samego ciała stałego w danej cieczy i w wodzie, strat, przedstawiających, jak wiemy, ciężary równych objętości tych cieczy. Niechaj naprzykład kula szklana, częściowo napełniona rtęcią (fig. 80) traci w kwasie siarczanym $^9/_{10}$ grama, w wodzie zaś—$^1/_2$ grama, wtedy ciężar wł. kwasu siarczanego równa się oczywiście $^9/_{10} : {^1/_2}$, t. j. 1,8. Albo też waży się małą flaszeczkę z odszlifo-

wanym korkiem (fig. 81, str. 113), z początku pustą, następnie napełnioną wodą, w końcu zaś napełnioną badaną cieczą. Do tego celu jeszcze lepiej się nadają omówione już wyżej pyknometry. Nareszcie ciężar właściwy cieczy można znaleźć za pomocą aerometru Fahrenheita, który różni się od poprzednio opisanego tem, że jest cały ze szkła i że, zamiast koszyka, posiada na dole stale przylutowaną kulkę szklaną, napełnioną rtęcią, tak że środek ciężkości aerometru, zanurzonego w wodzie, leży niżej od środka ciężkości wypchniętej przezeń cieczy. Oznaczywszy ciężar przyrządu, zanurza się go w wodzie i kładzie na talerzyk tyle gwichtów, ażeby pogrążył się w nią do pewnej stałej kreski (fig. 82): suma ciężarów aerometru i gwichtów daje nam wagę wypchniętej wody. Następnie powtarza się to samo względem badanej cieczy: suma ciężarów aerometru i gwichtów, jakie należy położyć na talerzyku, ażeby znowu zanurzył się do tej samej kreski, daje nam wagę objętości tej cieczy, równej objętości poprzednio wypchniętej wody. Liczba, wyrażająca tę drugą sumę, podzielona przez liczbę, pokazującą pierwszą sumę, daje ciężar wł. badanej cieczy.


Fig. 82. Ciężar wł. cieczy. Aerometr Fahrenheita.

Aerometry Nicholsona i Fahrenheita, będąc stosownie obciążone, zanurzają się w różnych cieczach do tej samej wysokości, innemi słowy wypychają stałą objętość tychże, dlatego też nazywają się aerometrami *o stałej objętości*. Oprócz nich istnieją jeszcze inne, posiadające stały ciężar, lecz zanurzające się w różnych cieczach do rozmaitej wysokości — czyli do różnej podziałki naciętej na nich skali — są to tak zwane aerometry *o stałym ciężarze*, albo inaczej aerometry *podziałkowe*. Składają się one ze szklanego naczynia, przedłużającego się ku górze

w bardzo wązką, lecz możliwie walcowatą rurkę i wydętego od dołu w kulkę, którą wypełnia się taką ilością rtęci, ażeby aerometr w najlżejszej nawet badanej cieczy nie zupełnie się zanurzał, oraz ażeby, wskutek swego nizko położonego środka ciężkości, utrzymywał się w niej w położeniu pionowem. Aerometry podziałkowe polegają na tej zasadzie, że jedno i to samo ciało zanurza się w danej cieczy tem głębiej, im jest ona lżejszą, z czego wynika, że objętości różnych cieczy, wypchnięte przez ten sam aerometr, są w stosunku odwrotnym do ich ciężarów właściwych. Skale takich aerometrów są różne, zależnie od celu, do jakiego służyć mają; zawsze jednak za punkt wyjścia obiera się punkt, do którego przyrząd zanurza się w dystylowanej wodzie, mającej 4° C.

Rozważmy teraz sposób użycia kilku ważniejszych aerometrów tego rodzaju. Volumetr (objętościomierz) Gay-Lussac'a jestto szklany przyrząd, urządzony w sposób wyżej podany, który pokazuje, jaka objętość badanej cieczy waży tyle, ile cały przyrząd. Niechaj ten ostatni waży 200 gr.; wtedy wiemy, że, pływając po jakiejkolwiek cieczy, wypycha z niej 200 gr.; a że 1 gr. dystylowanej wody, mającej 4° C., zajmuje objętość 1 centymetra sześc.,—przeto objętość aerometru, aż do punktu do którego zanurza się on w takiej wodzie, równa się 200 cent. sześc.; punkt ten oznaczamy liczbą 200. Znając objętość całego aerometru, możemy po obu stronach owego punktu naciąć na nim taką skalę, ażeby objętość między dwiema następującemi po sobie podziałkami dokładnie wynosiła 1 cent. sześc.; kreski, leżące wyżej rzeczonego punktu, oznacza się po kolei liczbami 201, 202 i t. d.; niższe zaś—liczbami 199, 198, 197 i t. d. Wprowadziwszy taki aerometr do danej cieczy i zaznaczywszy podziałkę, do której się zanurza, wiemy, jaka objętość cieczy waży 200 gr.; ta ostatnia liczba, podzielona przez liczbę, stojącą przy danej podziałce, daje nam ciężar 1 cent. sześc. cieczy, a więc jej ciężar wł. Jeżeli naprzykład volumetr zanurza się w roztworze jakiejś soli do 180 podziałki, to ciężar wł. tej cieczy równa się $^{200}/_{180}$ czyli 1,11; albo jeżeli w spirytusie zanurza się do 210 podziałki, to jego ciężar wł. równa się $^{200}/_{210}$ czyli 0,95 i t. d. Widzimy, że zamiast

odpowiednich objętości, można przy oddzielnych podziałkach, stawiać liczby, otrzymane z powyższego dzielenia, wskazujące bezpośrednio ciężar wł. danej cieczy.

W praktyce jednak zwykle nie chodzi o znalezienie ciężaru wł. danej cieczy, lecz o zawartość w niej soli, kwasu, alkoholu lub innych ciał, przyczem pożądaną jest możność bezpośredniego odczytywania rzeczonej zawartości; aerometry podobne zaopatrzone są przeto w różne skale, po największej części dowolne, lecz dogodne dla danego celu. Tak naprzykład w aerometrze Beaumé'go, służącym do oznaczania stopnia stężenia różnych kwasów, syropów, roztworów soli i t. d., w ogóle cieczy cięższych od wody,—punkt, do którego przyrząd zanurza się w czystej wodzie (fig. 83, A), oznaczony jest liczbą 0, punkt zaś, do którego pogrąża się w roztwór 15 części wagowych soli kuchennej w 85 cz. wody—liczbą 15. Odstęp pomiędzy temi punktami podzielony jest na 15 równych części i skala taka przeprowadzoną jest mniej więcej do 70 podziałki. Aerometr ten, którego punkt, oznaczony 0-em, leży prawie przy samym górnym końcu przyrządu, zanurza się w bezwodnym kwasie azotnym do 36, w jednowodnym kwasie siarczanym do 66 podziałki i t. d.

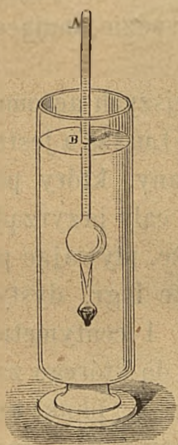


Fig. 83. Aerometr Beaumé'go.

Również dowolną jest skala, przyjęta przez Beaumé'go dla aerometrów, służących do badania cieczy, lżejszych od wody, naprzykład spirytusu. Zero tej skali stawia się w punkcie, do którego aerometr zanurza się w roztworze 10 części soli kuchennej w 90 częściach wody, liczbę zaś 10—w punkcie, do którego pogrąża się on w czystą wodę; odstęp pomiędzy temi punktami dzieli się na 10 równych części i skalę taką przeprowadza dalej aż do górnego końca przyrządu. Spirytus, mający dajmy na to 36° Beaumé'go, będzie to więc taka mięszanina alkoholu i wody, w której alkoholometr Beaumé'go zanurza się do 36 podziałki; co do właściwej zawartości alkoholu, przyrząd ten nie daje, jak widzimy, żadnej bezpośredniej wskazówki.

O wiele lepszym od ostatnio opisanego przyrządu jest alkoholometr Trallesa, którego zasadę podał był już dawniej Gay-Lussac i którego skala urządzona jest według wyników bardzo starannych badań nad ciężarem wł. różnych mięszanin alkoholu z wodą. Badania te doprowadziły, pomiędzy innemi, do ważnego i nader ciekawego rezultatu, że objętość mięszaniny alkoholu z wodą jest mniejsza, niż suma objętości składowych cieczy ([1]) i przez to jej ciężar wł. jest większym od tego, jaki wypada z obliczenia, uwzględniającego tylko objętości mięszanych z sobą cieczy. Alkoholometr Trallesa (fig. 84) bezpośrednio podaje procent na objętość alkoholu, zawartego w mięszaninie. Punkt, do którego zanurza się on w dystylowanej wodzie, oznaczony jest 0, zaś ten, do którego pogrąża się w absolutny (t. j. bezwodny) alkohol — liczbą 100. Jeżeli naprzykład alkoholometr ten zanurza się w danym spirytusie do 70 podziałki, to 100 jego cent. sześc. zawiera 70 cent. sześc. alkoholu. Inne alkoholometry, jak Richtera, bezpośrednio wskazują procent alkoholu na wagę.

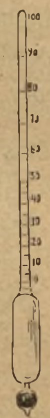


Fig. 84. Alkoholometr Trallesa.

Ponieważ objętość oraz ciężar wł. cieczy zmienia się wraz z temperaturą, przeto każdy aerometr daje dokładne wskazówki tylko przy pewnej określonej temperaturze, normalnej dla danego przyrządu; dla alkoholometru Gay-Lussaca temperaturą tą jest 15° C., dla alkoholometru Trallesa 16° C. i t. d. Czyniąc zaś spostrzeżenia przy innej jakiejś temperaturze, należy do bezpośrednio odczytywanych wartości wprowadzić pewne poprawki według specyalnie do tego celu ułożonych tablic.

Podobnie urządzone są wszelkie inne aerometry, służące do badania różnych cieczy, jak syropów, piwa, wina, mleka i t. d., w szczegółowy opis których nie możemy się tu jednak wdawać.

([1]) Patrz także str. 78.

ROZDZIAŁ VII.

Działania międzycząstkowe w cieczach.

§ 1. Napięcie powierzchniowe. Zjawiska włoskowatości.

Czytelnik przypomina sobie doświadczenia, opisane w początku V-go rozdziału (str. 75), dowodzące z jednej strony istnienia *spójności* pomiędzy cząstkami cieczy, z drugiej—*przylegania* ich do ciał stałych. Badając prawa równowagi cieczy, pominęliśmy chwilowo wpływ tych czynników, obecnie atoli należy, dla uzupełnienia nauki o cieczach, rozważyć pewne bardzo ciekawe zjawiska, będące rezultatem ich spójności i przylegania. Zobaczymy, że w pewnych warunkach czynniki te modyfikują nie-

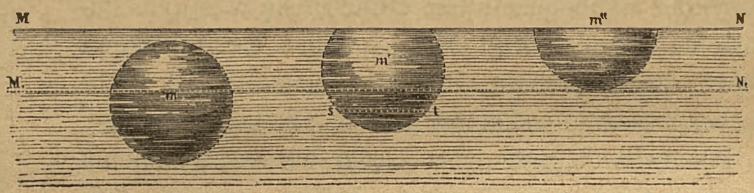


Fig. 85. Napięcie powierzchniowe cieczy.

które z opisanych przez nas praw, dotyczących zachowania się cieczy. Zbadajmy najprzód te działania, jakim ciecze ulegają niezależnie od naczyń, w których są zamknięte. Spójność pomiędzy cząstkami cieczy warunkuje się ich wzajemną dążnością do zbliżania się, innemi słowy tem, że każda z nich przyciąga i jest przyciąganą przez sąsiednie cząstki, znajdujące się na niezmiernie małej od niej odległości. Wyobraźmy sobie, że wokoło cząstki *m* jakiejbądź cieczy (fig. 85) zakreśliliśmy kulę o promieniu, równym odległości, na jakiej cząstki mogą jeszcze przyciągać się wzajemnie; w takim razie, tylko te z nich, które leżą wewnątrz rzeczonej kuli, przyciągają cząstkę *m* oraz są przez nią przyciągane, kula ta przedstawia więc *sferę przyciągania* tejże cząstki. Masa cieczy, tworząca kulę, jest zupełnie jednostajnie w niej rozmieszczoną i przyciągania, wywierane na czą-

stkę m ze wszystkich stron, wzajemnie się równoważą tak, że cząstka ta zachowuje się, jak gdyby przyciągania, o których mówimy, wcale nie istniały. Inaczej się rzecz ma z cząstką m'', leżącą na samej powierzchni $M\,N$; widzimy, że tylko z jednej strony otaczają ją cząstki, leżące w sferze jej działania tak, że w tym wypadku przyciągania, wywierane na nią przez te cząstki, nie są zrównoważone przez przyciągania cząstek, leżących nad nią, tam bowiem niema już żadnej cieczy. Łatwo dowieść, że przyciąganie, wywierane na tę cząstkę przez całą masę cieczy, zawartej w dolnej, jedynie istniejącej tu, połowie jej sfery działania, wpływa tak samo, jak gdyby na cząstkę m'' działała tylko jedna siła, przyciągająca ją do wnętrza i prostopadła do powierzchni $M\,N$ cieczy. Siła ta więc działa podobnie jak ciężkość, wskutek czego ciśnienie cząstki m'' i wszystkich w ogóle cząstek, leżących na samej powierzchni cieczy, jest większem od tego, jakie wypadałoby z samego tylko ich ciężaru. Nareszcie rozważmy jakąbądź cząstkę, naprzykład m', leżącą pomiędzy warstwami $M\,N$ i $M'\,N'$, odległość pomiędzy któremi niechaj się równa promieniowi sfery przyciągania. Sfera ta dla cząstki m' niejednostajnie wypełniona jest cieczą, w dolnej bowiem jej połowie znajduje się warstwa, odcięta płaszczyzną st, której przyciągania nie równoważy przyciąganie takiejże warstwy od góry, niema tam bowiem już cieczy; dlatego też cząstka m' jest silniej przyciąganą ku dołowi, niż ku górze. Przyciąganie nadmiarowej tej dolnej warstwy działa na cząstkę m', jak jedna przyciągająca ją do wnętrza siła, również prostopadła do powierzchni cieczy, lecz mniejsza niż w poprzednim wypadku. To samo dotyczy wszystkich cząstek, leżących pomiędzy $M\,N$ i $M'\,N'$ tak, że tworzą one warstewkę, wywierającą ciśnienie z góry na dół, większe niż to, jakie wywypadałoby z samego tylko jej ciężaru. Wokoło kulistej naprzykład masy cieczy, cząstki te tworzą warstewkę, dającą się poniekąd porównać do rozciągniętego kauczuku, otaczającego ciecz ze wszech stron; warstewka ta działa jakby nieskończenie cienki i nieco rozciągnięty nabłonek, który dzięki swéj sprężystości, dąży do skurczenia się. Każda ciecz, zawarta w jakiembądź naczyniu, ulega wpływowi takiej warstewki, tworzącej się nietylko

na górnej powierzchni, ale także na powierzchniach, któremi ciecz graniczy ze ścianami i dnem naczynia. Ciśnienie tej warstewki rozchodzi się we wszystkich kierunkach, podług ogólnych praw, które wyżej poznaliśmy; nosi ono nazwę *napięcia powierzchniowego.*

Można łatwo dowieść, że wielkość tego napięcia zmienia się, zależnie od tego, czy powierzchnia cieczy jest płaską, czy krzywą. Niechaj naprzykład *M* (fig. 86) wyobraża cząstkę jakiejbądź cieczy, leżącą pod powierzchnią na odległości mniejszej, niż promień sfery przyciągania tejże cząstki, którą to sferę wyobraża cała kula o promieniu *M C*, przedstawiająca się na płaszczyznie papieru jako koło. Jeżeli ciecz kończy się płaską powierzchnią *A B*, to przyciąganie wywierane z dołu do góry na cząstkę *M* przez warstwę cieczy *P A B Q* równoważy się z przyciąganiem warstwy *P Q B' A'*, działającem w kierunku wręcz przeciwnym. Ponieważ zaś, według założenia, nad powierzchnią *A B* niema już cieczy, to przyciąganiu warstwy *A' B' C* nic nie przeciwdziała od góry i cząstka *M* ulega napięciu powierzchniowemu. Przypuśćmy jednak, że ciecz nie jest ograniczona płaską powierzchnią, lecz wklęsłą *D H E;* wtedy przyciągania warstw cieczy *P Q E H D* i *P Q E' H' D'* wywierane na cząstkę *M*, znoszą się wzajemnie i pozostaje tylko niezrównoważony wpływ warstwy *D' C E' H'*, mniejszej niż w poprzednim wypadku, mniejszem więc także jest napięcie powierz-

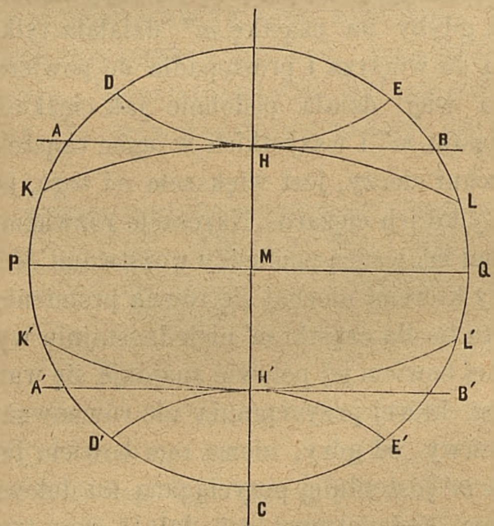


Fig. 86. Napięcie powierzchniowe cieczy na powierzchni płaskiej, wklęsłej i wypukłej.

chniowe cząstki M. Gdy nakoniec ciecz ograniczona jest powierzchnią wypukłą $K\ H\ L$, wtedy przyciągania warstw cieczy $P\ K\ H\ L\ Q$ i $P\ Q\ L'\ H'\ K'$ znoszą się i pozostaje niezrównoważone działanie warstwy $K'\ C\ L'\ H'$, większej niż w pierwszym z rozważanych tutaj wypadków, napięcie więc powierzchniowe cząstki M jest większem. Stosując podobne rozumowanie do wszystkich w ogóle cząstek, dla których sfery przyciągania nie całkowicie wypełnione są cieczą, dochodzimy do wniosku, że napięcie powierzchniowe zmienia się wraz ze zmianą kształtu powierzchni. Na powierzchniach wklęsłych jest ono mniejsze, na wypukłych— większe, niż na powierzchniach płaskich, przyczem różnice te są tem znaczniejsze, im większą jest krzywizna danych powierzchni, innemi słowy im są one bardziej wklęsłe lub wypukłe.

Napięcie powierzchniowe tłómaczy nam zjawisko dobrze znane, a mianowicie, że często cząstki gazu zawartego w cieczy zamiast wyjść na zewnątrz, zbierają się pod samą jej powierzchnią; gaz bowiem, pomimo dążności jego do rozprzestrzeniania się, zostaje zatrzymany przez warstewkę nabłonkową. Następujące doświadczenie, które każdy z łatwością może powtórzyć, dowodzi jeszcze lepiej istnienia takiej warstewki: nasypmy bardzo delikatnego piasku na powierzchnię rtęci i zagłębiajmy w nią powoli pałeczkę szklaną; zobaczymy, że ziarnka piasku poruszają się w kierunku zagłębienia, w miarę zaś wyjmowania pałeczki, napowrót wznoszą się do góry, dopóki znów nie znajdą się na powierzchni rtęci. Doświadczenie to—do którego można zamiast rtęci użyć jakiejbądź innej cieczy, byle tylko nie przylegała do danej pałeczki—dowodzi, że piasek istotnie leży tutaj jakby na nabłonku, który zagłębia się i podnosi wraz z pałeczką, nie ulegając przytem rozdarciu, lecz tylko rozciągając się i kurcząc naprzemian.

Widzieliśmy tedy, że wskutek spójności pomiędzy cząstkami cieczy, wpływ na nie siły ciężkości ulega pewnej modyfikacyi; obecnie zaś przekonamy się, że i zjawiska, występujące przy zetknięciu cieczy z ciałami stałemi, także nieco zmieniają rezultat działania tej siły. Przypomnijmy sobie, że przyleganie cieczy do ciała stałego może być większe lub mniejsze od spójności jej

cząstek i że w pierwszym razie ciało stałe zostaje zwilżone przez ciecz, w drugim zaś—nie; np. szkło i drzewo zostają zwilżone przez wodę, lecz nie przez rtęć; ta ostatnia natomiast zwilża miedź i złoto. Przy rozważaniu skutków jednoczesnego działania spójności cieczy i przylegania jej do ciała stałego, należy bardzo ściśle odróżniać dwa te wypadki, albowiem rezultaty, jak zaraz zobaczymy, w obu razach są zupełnie odmienne.

Wiemy już, że swobodna powierzchnia cieczy, znajdującej się w stanie spoczynku i podległej jedynie działaniu siły ciężkości, jest płaszczyzną poziomą. Lecz kształt taki ulega znacznym zmianom wtedy, gdy wchodzi w grę inny jeszcze czynnik, a mianowicie przyleganie cieczy do naczynia, w którem jest ona zamkniętą. Właściwie mówiąc, zdarza się bardzo rzadko, ażeby powierzchnia cieczy dokładnie zachowała swój kształt poziomy w blizkości ścianki naczynia; ma to mianowicie miejsce tylko wtedy, gdy przyleganie cieczy do ścianki jest zupełnie równe spójności jej cząstek, a więc gdy dwa te działania będąc równe i przeciwne, znoszą się wzajemnie. Rozważmy teraz drugi wypadek, gdy przyleganie cieczy do ścian jest większe, niż jej spójność. Cząstki cieczy, leżące bezpośrednio przy ścianie, podnoszą się wtedy wzdłuż niej; dalsze również się podnoszą, lecz na mniejszą wysokość i to tem mniejszą, im bardziej są od niej oddalone, albowiem przyciąganie owo słabnie w miarę odległości. Wreszcie dochodzimy do takich cząstek cieczy, leżących na powierzchni, na które przyciąganie ściany albo wcale już nie działa, albo działa tak słabo, że zachowują one położenie poziome; cząstek zaś takich będzie oczywiście tem więcej, im większą jest powierzchnia danej cieczy, czyli im bardziej ścianki są od siebie oddalone. W szerokiem tedy naczyniu, zawierającem ciecz, która zwilża jego ścianki, zmiana kształtu jej powierzchni mało jest widoczną; tylko wokoło ścianek jest ona nieco wzniesioną, jak naprzykład powierzchnia wody, zawartej w karafce. Przeciwnie w naczyniu o bardzo małej średnicy, naprzykład w rurce szklanej tak wązkiej, że można ją poniekąd porównać do włosa—ztąd nazwa rurek włoskowatych — kształt powierzchni zawartej w niej wody jest mocno zmieniony, widzimy bowiem (fig. 87),

że powierzchnia ta jest zupełnie wklęsłą; jestto tak zwany *menisk* wklęsły. *W podobny sposób zachowują się wszystkie ciecze, zawarte w rurkach włoskowatych i zwilżające ich ścianki.*

Trzeci nareszcie wypadek polega na tem, że spójność pomiędzy cząstkami cieczy jest większa, niż przyleganie ich do ścian naczynia; cząstki leżące najbliżej tych ostatnich, obniżają się, przez co ciecz dokoła ścianki wgłębia się. Wgłębienie to jest tem nieznaczniejsze, im dalej cząstki leżą od ściany; tutaj więc także znajdują się takie, które nie zmieniają swego położenia. Nalejmy naprzykład rtęci do szklanego naczynia, a zobaczymy, że wokoło jego ścianek obniża się ona i to tem bardziej, im mniejszą jest średnica naczynia, tak że w szklanej rurce włoskowatej, rtęć przedstawia powierzchnię zupełnie wypukłą, tworząc *menisk* wypukły (fig. 88). *Tak samo zachowują się wszystkie ciecze nie zwilżające ścianek naczynia.*



Fig. 87. Wklęsły menisk cieczy, zwilżającej ściany rurki

Te zmiany kształtu, jakim ulega powierzchnia cieczy wskutek zetknięcia ze ścianami naczyń, w połączeniu z napięciem nabłonkowem, w wysokim stopniu modyfikują warunki równowagi cieczy w naczyniach połączonych. Porównajmy naprzykład ciśnienia, wywierane przez ciecz na dwa jej elementy *b* i *c*, leżące w tej samej płaszczyźnie poziomej *M' N'* (figury 89 i 90, str. 124), lecz znajdujące się, jeden—*b* pod powierzchnią krzywą, drugi zaś—*c* pod płaską. Ciśnienie na element *c*, leżący na zewnątrz rurki włoskowatej, równa się ciężarowi słupa cieczy, mającego za wysokość odległość (*c d*) tego elementu od poziomu cieczy, za podstawę zaś—powierzchnię tego elementu. W punktach *b*, leżących w tej samej płaszczyźnie, lecz pod powierzchnią krzywą, ciśnienie słupa cieczy, mającego tę samą wysokość i podstawę, jest jednak mniejsze lub większe, niż w punktach *c*, zależnie od tego, czy słup ten kończy się powierzchnią



Fig. 88. Wypukły menisk cieczy, nie zwilżającej ścian rurki.

wklęsłą, czy też wypukłą. W pierwszym mianowicie razie (fig. 89) napięcie powierzchniowe cieczy w rurce włoskowatej, jest mniejsze, niż w naczyniu (patrz str. 120) i dlatego ciecz w rurce podnosi się tak długo, dopóki ciężar słupa cieczy, o wysokości równej różnicy *a b* i *c d*, nie zrównoważy owej różnicy w natężeniu napięć powierzchniowych. W wypadku zaś, **gdy** powierzchnia cieczy w rurce włoskowatej jest wypukłą (fig. 90), a więc gdy jej napięcie powierzchniowe jest większe, niż na zewnątrz rurki, wtedy w tej ostatniej ciecz obniża się tak długo, dopóki ciężar słupa cieczy, o wysokości równej różnicy *c d* i *a b*, znowu nie zrównoważy różnicy w natężeniu napięć powierzchniowych. Figury 91 i 92 pokazują wpływ napięcia powierzchniowego na równowagę cieczy w rurkach włoskowatych. Widzimy tutaj dwa układy naczyń, utworzonych przez połączenie rurki o większej średnicy z rurką włoskowatą. W szerszych rurkach, gdzie powierzchnie cieczy są prawie poziome, wpływ ich krzywizny na wysokość cieczy jest bardzo nieznaczny; natomiast w rurkach włoskowatych, w których powierzchnie te są zupełnie krzywe, ciecz podnosi się (fig. 91) lub opuszcza (fig. 92, str. 125) i to tem bardziej, im większą jest wklęsłość lub wypukłość jej powierzchni.

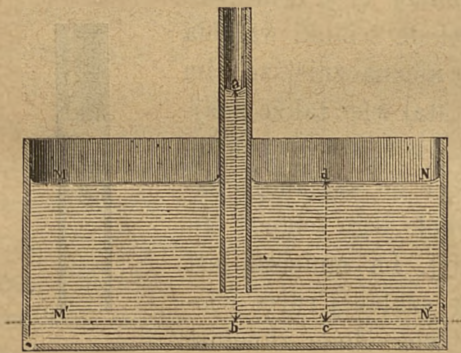


Fig. 89. Ciecze, ograniczone powierzchnią wklęsłą, podnoszą się w rurce włoskowatej wyżej, niż w otaczającem ją naczyniu.

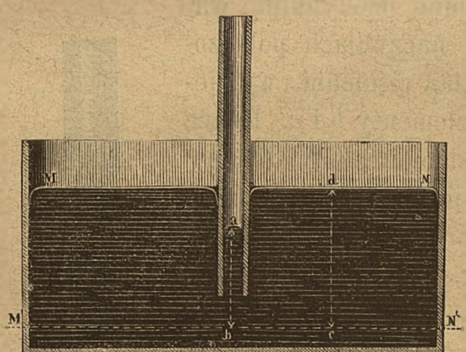


Fig. 90. Ciecze, ograniczone powierzchnią wypukłą, stoją w rurce włoskowatej niżej, niż w otaczającem ją naczyniu.

Podnoszenie lub obniżanie się cieczy w rurkach włoskowatych ulega następującemu prawu: *Dla jednej i tej samej cieczy i dla rurek z tego samego materyału, różnica w wysokości poziomów cieczy w rurce włoskowatej i na zewnątrz jest w stosunku odwrotnym do średnicy rurki* (dopóki wielkość tej średnicy nie przewyższa 2 milimetrów).

Zjawiska włoskowatości dają się także obserwować wtedy, gdy ciecz znajduje się pomiędzy dwiema ściankami, bardzo zbliżonemi jedna do drugiej; jeżeli ciecz ta zwilża ścianki, podnosi się ona do pewnej wysokości w przestrzeni, oddzielającej je od siebie, w przeciwnym zaś razie ciecz spada tutaj poniżej poziomu zewnętrznego.

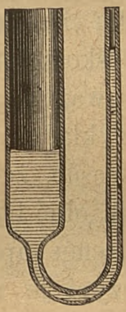


Fig. 91. Podnoszenie się wody w rurce włoskowatej (szklanej).

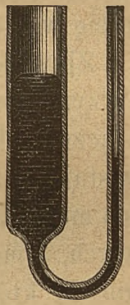


Fig. 92. Obniżanie się rtęci w rurce włoskowatej (szklanej).

Pomiędzy płaskiemi ściankami wysokość cieczy również jest w stosunku odwrotnym do odległości oddzielającej je od siebie w danym punkcie. Jeżeli więc ścianki te są równoległe, ciecz dochodzi pomiędzy niemi wszędzie do tej samej wysokości, lecz gdy tworzą z sobą niewielki kąt, ciecz podnosi się tem wyżej, im mniejszą jest odległość pomiędzy niemi (fig. 93).

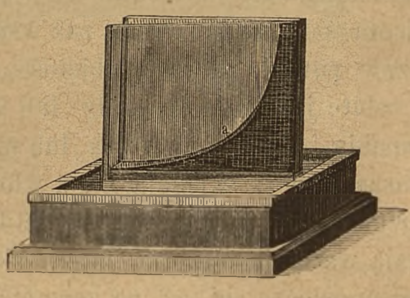


Fig. 93. Podnoszenie się wody pomiędzy dwiema szklanemi tafelkami, tworzącemi niewielki kąt.

Wyżej opisane prawa napięcia powierzchniowego tłómaczą także niektóre ciekawe zjawiska ruchu cieczy. Wprowadźmy kroplę cieczy do rurki stożkowatej. Jeżeli ciecz zwilża ścianki, kropla będzie się poruszała w stronę węższej części rurki, w przeciwnym razie ruch jej przyjmie kierunek odwrotny. W pierwszym bowiem wypadku powierzchnie kropli są wklęsłe, przyczem w szerszej części rurki wklęsłość jest mniejszą

(fig. 94), niż w węższej, a więc i ciśnienie powierzchniowe jest tam większe, niż po stronie przeciwnej i kropla porusza się w kierunku większego ciśnienia. Przeciwnie, gdy ciecz nie zwilża ścianek, powierzchnie jej są wypukłe, przyczem w szerszej części mniej niż w węższej (fig. 95), a więc i ciśnienie powierzchniowe jest tam mniejsze, niż po drugiej stronie i ciecz tak samo porusza się w kierunku ciśnienia większego ([1]).

Zjawiska włoskowatości są bardzo szeroko rozpowszechnione w przyrodzie, a uważny czytelnik znajdzie w codziennem życiu tysiączne ich przykłady. Wilgoć naprzykład w domach naszych powstaje w ten sposób, że woda podnosi się w wązkich szczelinach murów, belek, obić i t. d., podobnie jak w rurkach włoskowatych, a można temu zapobiedz, pokrywając przedmioty te substancyą, która czyni je niezwilżalnemi przez wodę. Wskutek

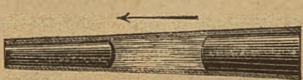


Fig. 94. Ruch wody w stożkowatej rurce szklanej.

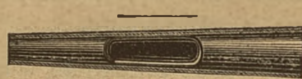


Fig. 95. Ruch rtęci w stożkowatej rurce szklanej.

włoskowatości nafta lub olej podnoszą się wzdłuż włókienek knota od lampy, woda zaś wsiąka w drzewo, które wtedy znacznie powiększa swą objętość, tak, że będąc zmoczone wodą i wbite jako klin do skały lub kamienia, może służyć do ich rozłupania. Wełna, bawełna lub nici, z których zrobioną jest cała nasza odzież, składają się z włókienek, przedziały zaś pomiędzy niemi stanowią nadzwyczaj delikatne rurki. W rurki te wsiąkają wszelkie wyziewy naszej skóry, które wskutek włoskowatości przenoszą się aż na zewnętrzną powierzchnię odzieży, gdzie ulatniają się. W naszym organizmie znajduje się olbrzymia sieć krwionośnych naczyń włoskowatych, roznoszących krew do najdrobniejszych elementów ciała. Rośliny pobierają soki z ziemi za pomocą naczyń włoskowatych korzeni; soki te podnoszą się w naczyniach włoskowatych łodygi i dochodzą aż do liści i t. d.

(1) Patrz także str. 120.

§ 2. Doświadczenia Plateau. Zjawiska dyfuzyi i osmozy cieczy. Dializa.

Podobnie jak działanie cieczy na ciała stałe bywa, jak widzieliśmy wyżej, bardzo rozmaite, tak też i wpływ cieczy jednych na drugie jest niejednakowy. Gdy do naczynia wprowadzimy dwie ciecze, mające różny ciężar właściwy, wtedy albo ułożą się one według swych gęstości, albo też zmieszają ze sobą w jednę ciecz, jednostajnie wypełniającą naczynie. Tak np. woda z alkoholem mieszają się z sobą we wszelkich stosunkach, woda zaś z oliwą wcale się nie mięszają, lecz układają pierwsza pod drugą. Gdy natomiast w jednem i tem samem naczyniu znajdują się dwie ciecze, mające jednakowy ciężar właściwy, lecz nie mieszające się z sobą, np. oliwa i odpowiednia mięszanina wody z alkoholem, wtedy ciecze te nie układają się warstwami jedna nad drugą, lecz oliwa przyjmuje postać kulistych kropel, unoszących się wewnątrz owej mieszaniny.

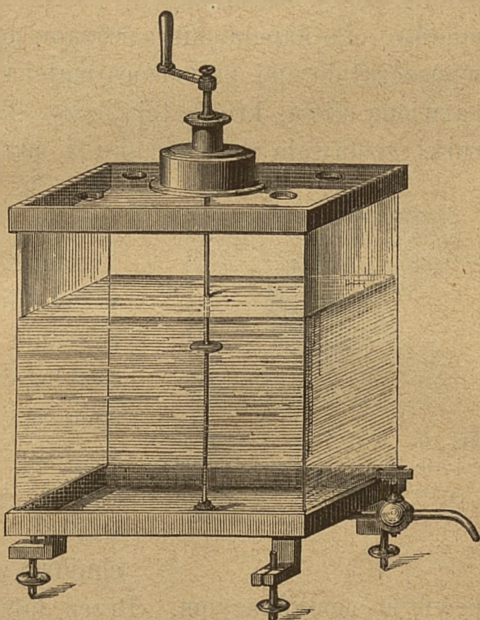


Fig. 96. Naczynie do doświadczeń Plateau.

Ponieważ w danym razie objętość wypchniętej przez oliwę cieczy waży tyleż, co i sama oliwa, ta ostatnia traci przeto cały swój ciężar i znajduje się jedynie pod wpływem przyciągającego działania cząstek alkoholu oraz działania spójności własnych cząstek. Przeważa tu spójność i oliwa musi przyjąć taką postać, ażeby napięcie powierzchniowe było we wszystkich punktach jednakowe; warunkowi zaś temu czyni zadosyć tylko kulista forma cieczy. Uczony belgijski

Plateau przeprowadził liczne, znakomite doświadczenia, poświęcone badaniu kształtów, jakie przyjmują ciecze, gdy są zanurzone w cieczach o takim samym ciężarze właściwym, a więc gdy działanie siły ciężkości na nie zostaje zrównoważone parciem z dołu do góry. Przy tych doświadczeniach Plateau posługiwał się sześciennem naczyniem szklanem (fig. 96, str. 127), na dnie którego znajdował się kran do wypuszczania cieczy, w górnej zaś ściance porobione były rozmaite otwory, umożliwiające wprowadzanie cieczy oraz różnych, potrzebnych w danym razie, przedmiotów. Po napełnieniu sześcianu mięszaniną wody z alkoholem, wpuszczał do niej, za pomocą małej rurki, napełnionej lekko zabarwioną oliwą, kroplę tej cieczy, która po ostrożnem wyjęciu rurki, zostawała w spoczynku i przyjmowała postać dokładnej kuli (fig. 97), tak jak wymaga tego teorya.

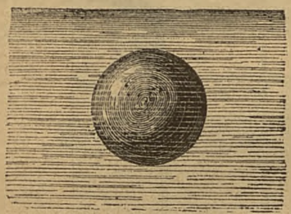


Fig. 97. Kształt cieczy, znajdującej się pod wpływem działania przeważającej spójności swych cząstek.

Gdy taką kroplę wprowadzano w zetknięcie z drutem żelaznym, poprzednio zwilżonym oliwą, kropla przylegała do żelaza tak, że oprócz spójności oliwy, wchodziło jeszcze w grę przyleganie jej do tego metalu. Kształt jej powierzchni zmieniał się wtedy, albowiem napięcie powierzchniowe w niektórych punktach ulegało pewnym modyfikacyom. Przez użycie drucianych figur najrozmaitszych kształtów, Plateau nadawał cieczy postać dwuwypuklej soczewki, cylindra, sześcianu, ośmiościanu i t. p. figur, mających górne i dolne powierzchnie wypukłe, płaskie lub wklęsłe, zależnie od ilości oliwy, wprowadzanej w zetknięcie z siatką drucianą.

Bardzo ciekawe są rezultaty działania na takie krople oliwy innych jeszcze sił, oprócz spójności i przylegania. Dla zbadania tego wpływu Plateau umieścił wewnątrz wspomnianego naczynia (fig.96) pręt metalowy, idący od dna do górnej ścianki i zakończony rączką, za pomocą której pręt mógł być obracany. Przez środek drutu przechodził krążek, na którym, przy zachowaniu odpowie-

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

{Cena 20 kop.}

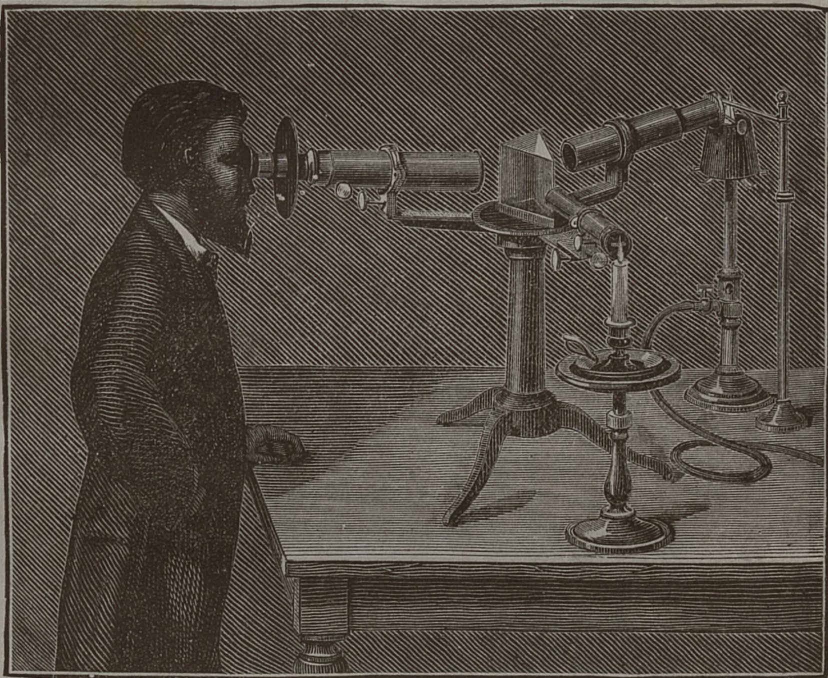
Zeszyt 5.

{Cena 20 kop.}

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique“

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Oławskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.

dniej ostrożności, zdołano zupełnie symetrycznie umieścić kulę z oliwy, mającą 6 cm. w przecięciu (fig. 98). Przy powolnem obracaniu pręta można było widzieć, jak kula stopniowo spłasz-

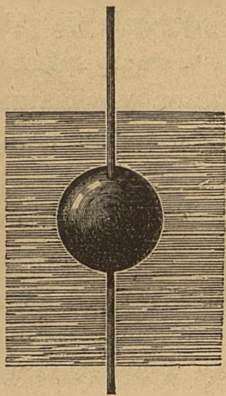


Fig. 98. Kula z oliwy, przylegająca do pręta metalowego.

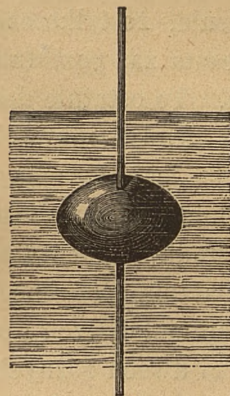


Fig. 99. Spłaszczenie kuli z oliwy, obracającej się naokoło osi.

czała się przy biegunach, przez które przechodził pręt, wypuklała się zaś na równiku (fig. 99). W miarę coraz szybszego ruchu obrotowego, kula stawała się coraz bardziej płaską, w końcu zupełnie oderwała się od krążka i przyjęła kształt prawidłowego pierścienia (fig. 100). W zjawiskach tych działa inna jeszcze siła, a mianowicie ta, która powstaje wskutek ruchu obrotowego pręta, a więc i kropli oliwy, przylegającej doń i do krążka. Dzięki temu ruchowi, cząstki oliwy starają się oddalić od osi obrotu i to z tem większą siłą, im większą jest prędkość obrotowa danej cząstki. Dążność do oddalania się jest największą na równiku kuli, tutaj bowiem cząstki jej opisują najdłuższą drogę, a więc mają największą prędkość obro-

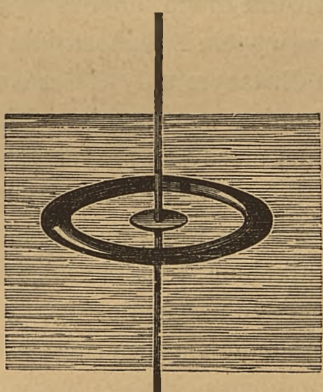


Fig. 100. Rezultat szybkiego ruchu obrotowego kuli z oliwy naokoło osi.

tową ([1]). Z początku dążności tej przeciwdziała napięcie powierzchniowe na powierzchni kuli, przy szybszym jednak ruchu dążność odśrodkowa bierze górę i cała masa oliwy odrywa się od osi. Plateau udało się także w taki sposób urządzić powyższe doświadczenie, że tylko część kuli z oliwy oderwała się jako pierścień, reszta zaś pozostała na krążku pod postacią spłaszczonego sferoidu. To ostatnie doświadczenie odtwarza w miniaturze proces, jaki niegdyś odbywał się na Saturnie; wiadomo bowiem, że planeta ta jest otoczoną pierścieniami, które, według hypotezy kosmogonicznej Laplace'a, oderwały się wskutek obrotowego ruchu od środkowej masy tejże planety.

Działania podobne do tych, jakie przejawiają się między cząstkami ciał stałych i ciekłych, mogą zachodzić także między cząstkami dwóch różnych cieczy. Nalejmy w naczynie wodnego, zabarwionego roztworu jakiegobądź ciała, a następnie ostrożnie dolejmy czystej wody tak, ażeby ta, nie poruszając roztworu, znalazła się nad nim. Zobaczymy, że pomimo zupełnego spokoju naczynia, roztwór zacznie się odbarwiać, woda zaś—zabarwiać, co dowodzi, że cząstki wody przechodzą do roztworu, cząstki zaś rozpuszczonego ciała—do wody. Proces ten, zwany *dyfuzyą*, trwa tak długo, dopóki obydwie ciecze nie zmieszają się zupełnie i nie wypełnią jednostajnie naczynia, co następuje po krótszym lub dłuższym upływie czasu, zależnie od rodzaju użytych cieczy i rozmiarów naczynia. Zjawisko dyfuzyi pokazuje, że cząstki jednej cieczy są przyciągane przez cząstki drugiej. Nie wszystkie jednak ciecze mają własność dyfundowania czyli mięszania się z sobą; woda np. dyfunduje do roztworu cukru lub soli, albo do alkoholu, lecz nie mięsza się z oliwą, z rtęcią i t. d. Chcąc oznaczyć natężenie siły, z jaką cząstki dwóch różnych cieczy wzajemnie się przyciągają, wprowadzamy je w zetknięcie i mierzymy czas, jakiego potrzebują do utworzenia zupełnie jednostajnej mięszaniny; otrzymujemy wtedy *szybkość dyfuzyi* danych cie-

---

([1]) Doświadczenie powyższe przedstawia miniaturowy obraz procesu spłaszczania się ziemi, obracającej się naokoło osi.—w czasie, gdy znajdowała się jeszcze w stanie płynnym.

czy. Znaleziono np., że szybkość dyfuzyi między wodą i wodnemi roztworami różnych soli zmienia się znacznie, zależnie od natury rozpuszczonego ciała. Dla jednego zaś i tego samego ciała, szybkość dyfuzyi jest w stosunku prostym do stężenia roztworu tak, że, przy innych warunkach jednakowych, ilość np. soli, jaka w określonym czasie przechodzi z wodnego jej roztworu do czystej wody, jest proporcyonalna do stopnia jego stężenia. Pod względem zdolności do dyfuzyi, ciecze można podzielić na dwie grupy: jedna obejmuje takie, które mięszają się ze sobą we wszystkich stosunkach, jak woda z alkoholem; do drugiej grupy należą ciecze, mięszające się tylko w pewnych ilościowych granicach, jak np. woda z eterem, które dyfundują tylko wtedy, gdy ilość pierwszej znacznie przeważa (1 część eteru na 10 części wody).

Dyfuzya cieczy nie ogranicza się na wypadku, gdy są one bezpośrednio z sobą zetknięte, ma ona bowiem miejsce i wtedy, gdy obydwie ciecze są rozdzielone dziurkowatą (porowatą) ścianką. Taki wypadek mięszania się cieczy nazywamy *osmozą* (Graham). Nalejmy alkoholu do rury, zamkniętej od dołu błoną zwierzęcą i zanurzmy rurę w wodzie tak, ażeby ta dotykała błony; wtedy alkohol będzie przechodził do wody i woda do alkoholu. To samo powtarza się, gdy do rury wprowadzamy roztwór np. soli i zanurzamy rurę jak poprzednio: sól przechodzi do wody, woda zaś przesiąka przez błonę do rury tak długo, dopóki ciecze po obu stronach błony nie staną się jednakowe. W większości wypadków można przytem zauważyć przybór cieczy po jednej stronie błony, w doświadczeniu bowiem z alkoholem i wodą, więcej wody przechodzi do alkoholu, niż naodwrót; tak samo, jeżeli między wodą i roztworem soli umieścimy dziurkowatą przegrodę, zobaczymy, że zawsze więcej wody przenika do soli, niż soli do wody. Jeżeli tedy rura zawiera wodę, poziom jej obniża się, jeżeli zawiera sól, ulega on podwyższeniu. Ta zmiana poziomu dowodzi, że przegroda, rozdzielająca dwie mięszające się z sobą ciecze, wywiera znaczny wpływ i że nadaje procesowi dyfuzyi charakter bardziej złożony. Uwidocznia się to jeszcze lepiej przy użyciu rozmaitych błon. Jeżeli np. między wodą i alkoholem umieścimy błonę kauczukową, której woda nie zwilża, wtedy tyl-

ko alkohol będzie przechodził do wody; gdy natomiast te same dwie ciecze rozdzielimy błoną zwierzęcą, zwilżaną przez wodę, w takim razie i ta ostatnia ciecz będzie przechodziła do alkoholu. Błona zwierzęca, umieszczona między kwasem solnym i wodą, przepuszcza kwas w większej niż wodę ilości; w tym razie obydwie ciecze zwilżają błonę, lecz kwas jest mocniej przez nią przyciągany. Fakty te dowodzą, że osmoza zależy nietylko od wzajemnego przyciągania cząstek różnych cieczy, lecz także od wielkości przylegania każdej z nich do wewnętrznych ścianek porów, przedstawiających poniekąd system rurek włoskowatych.

Co do szybkości osmozy, gdy zachodzi ona między czystą wodą i roztworem jakiegoś ciała, naprzykład soli kuchennej, wtedy szybkość, z jaką cząstki soli przechodzą do wody, tutaj także, jak przy zwykłej dyfuzyi, jest tem większą, im bardziej stężony jest roztwór. To samo stosuje się do cząstek wody tak, że ilość tej cieczy, w danym razie przechodząca do roztworu, wzrasta w miarę jego stężenia. Wreszcie gdy osmozie ulegają dwa różne roztwory, rezultat zależy nietylko od stopnia ich stężenia, lecz także od chemicznej natury rozpuszczonych ciał, których wzajemne przesiąkanie odbywa się tem szybciej, im większe jest ich powinowactwo chemiczne. Zgodnie z tem, osmoza kwasu i zasady jest szybsza, niż osmoza dwóch zasad lub dwóch kwasów. Ciała, któremi błona przed rozpoczęciem osmozy została zwilżoną, okazują wpływ na przebieg tego procesu. Błona naoliwiona, umieszczona między wodą i alkoholem, nie przepuszcza wody, tylko alkohol; białko łatwiej przechodzi przez błonę zwilżoną alkaliami. Mechaniczna budowa błony również wywiera znaczny wpływ na osmozę cieczy. Doświadczenia pokazały, że błona wycięta z żołądka lub jelit zwierzęcia, nie przepuszcza kurary i jadu wężowego, podczas gdy skóra i błony śluzowe pochłaniają z łatwością te trucizny ([1]). W organizmie ludzkim osmoza odgrywa ważną rolę przy pochłanianiu produktów trawienia oraz wymianie materyj, służących do odżywiania tkanek. Przez ścianki naczyń limfatycznych i krwionośnych

([1]) Daniell, Zasady fizyki.

może zachodzić osmoza, a proces ten w danym razie jest ułatwiony przez ruch cieczy w tych naczyniach. Limfa względem krwi zachowuje się tak, jak woda względem roztworów solnych, a osmoza, zachodząca w naszym organizmie, dąży do wprowadzenia cieczy jego do układu krwionośnego. Zjawiska osmozy są rezultatem dyfuzyi cieczy i ich przylegania do ciał stałych. Gdy mięszające się z sobą ciecze *A* i *B* rozdzielone są porowatą ścianką, przez którą jedna z cieczy, np. *A* jest silniej niż ciecz *B* przyciąganą, wtedy pierwsza przenika do otworów ścianki i przechodzi przez nie na drugą stronę, gdzie mięsza się z cieczą *B*. Następnie nowa ilość cieczy *A* przenika do otworów, zastępując tę część, która zmięszała się z cieczą *B* i tak dalej; w ten sposób powstaje ciągły prąd cieczy *A* ku cieczy *B*, płynący w blizkości ścianek otworów. Przez środkową zaś część każdego otworu dążą także w przeciwną stronę cząstki cieczy *B*, które jeszcze w otworze mięszają się z cząstkami cieczy *A* według praw zwykłej dyfuzyi. Powiadamy *zwykłej dyfuzyi* dlatego, że, w środkowej oddalonej od ścian części otworu, ciecze nie ulegają już ich przyciągającemu działaniu.

Znaczna ilość soli, kwasów, cukier, mocznik i t. p. ciał odznacza się wielką prędkością dyfuzyi, pewną trwałością chemiczną i zdolnością do przyjmowania formy krystalicznej; ciała takie zowią się *krystaloidami*. Inne zaś, jak guma, białko, żelatyna, krochmal, dyfundują powolnie, są niekrystaliczne czyli bezkształtne, klejowate; tworzą one grupę t. zw. *koloidów*. Jeżeli mięszaninę ciał koloidalnych i krystaloidalnych poddamy osmozie przez błonę dziurkowatą, wtedy pierwsze z tych ciał albo wcale nie przejdą przez błonę, albo przenikną przez nią w nader małej ilości; krystaloidy natomiast przejdą swobodnie. Jeżeli wprowadzimy do szklanej rury, dolny otwór której zamknięty jest pęcherzem, mięszaninę wodnych roztworów gumy i cukru i zanurzymy rurę dolnym jej końcem w naczyniu z wodą, tylko cukier przejdzie przez pęcherz do wody, guma zaś zostanie zatrzymaną. Opierając się na tym fakcie, Graham obmyślił nową metodę oddzielania koloidów od krystaloidów, zawartych w jednej mięszaninie. Mięszaninę taką wprowadza się do płaskiego drewnia-

nego naczynia, którego dno stanowi błona z odpowiednio przygotowanego papieru pergaminowego; naczynie to umieszcza się na czystej wodzie tak, ażeby po niej pływało. Tylko krystaloidy przechodzą przez błonę i to tak długo, dopóki wewnątrz i zewnątrz naczynia nie otrzymamy jednakowo stężonych roztworów krystaloidów. Następnie po wylaniu tej wody zastępujemy ją czystą, a wtedy nowa ilość krystaloidów przejdzie do niej; przez wielokrotne powtórzenie takiej operacyi możemy zupełnie usunąć krystaloidy z mięszaniny, zawartej w naczyniu. Taka metoda oddzielania ciał zowie się *dializą*, powyższe zaś naczynie *dializatorem*. Metoda ta nadaje się bardzo dobrze, między innemi, do oddzielania trucizn od pewnych materyj organicznych; w powyższych np. warunkach strychnina (krystaloid) przenika do wody, śluz zaś (koloid) pozostaje w naczyniu.

ROZDZIAŁ VIII.

Masowy ruch cieczy.

§ 1. Wypływ cieczy. Prawo Toricelli'ego.

Rozpatrzyliśmy dotychczas warunki równowagi cieczy oraz niektóre zjawiska ich ruchu, o ile one zależą od działania spójności cieczy i przylegania ich do ciał stałych. Rozważmy jeszcze wypadek, gdy całe masy cieczy poruszają się jedynie pod wpływem siły ciężkości.

Jeżeli w bocznej ścianie, lub na dnie naczynia, napełnionego cieczą, zrobimy niewielki otwór, ciecz będzie przezeń wypływała z prędkością tem większą, im głębiej dany otwór leży pod poziomem cieczy. Tę zależność między prędkością wypływu i odległością otworu od poziomu cieczy w naczyniu można łatwo objaśnić za pomocą następującego rozumowania: gdyby warstwa $a\ b\ c\ d$ (fig. 101, str. 135), znajdująca się bezpośrednio nad otworem $a\ b$, spadła z wysokości $c\ a$ sama jedna, nie będąc przytem uciskana przez leżący nad nią słup cieczy, wtedy, według praw spadku (str. 28), miałaby ona przy wyjściu z otworu prędkość,

proporcyonalną do pierwiastku kwadratowego z drogi przebytej, a więc—do pierwiastku kw. z *c a*. Lecz warstwa *a b c d* ulega przyśpieszeniu, wynikającemu nietylko z jej własnego ciężaru, ale nadto z ciężaru całej, spoczywającej nad nią cieczy tak, że istotne przyśpieszenie wypływającej warstwy *a b c d* jest o tyle większe od przyśpieszenia *g* w danem miejscu na ziemi, o ile wysokość *a f* cieczy jest większa od wysokości *c a* spadku. Rezultat więc jest tutaj taki sam, jak gdyby omawiana warstwa spadła z wysokości *a f*, innemi słowy, *prędkość wypływającej cieczy jest proporcyonalną do pierwiastku kwadratowego z odległości otworu od poziomu cieczy*. Prawo to nosi nazwę *zasady Toricelli'ego*, od imienia uczonego, który ją odkrył. Prędkość wypływu nie zależy od natury cieczy, ani od jej ciężaru właściwego tak, że przy jednakowej wysokości poziomów, woda naprzykład i rtęć będą wypływały z naczynia z jednakową prędkością.

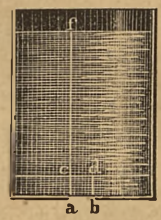


Fig 101. Wypływ cieczy. Teoretyczny dowód prawa Toricelli'ego.

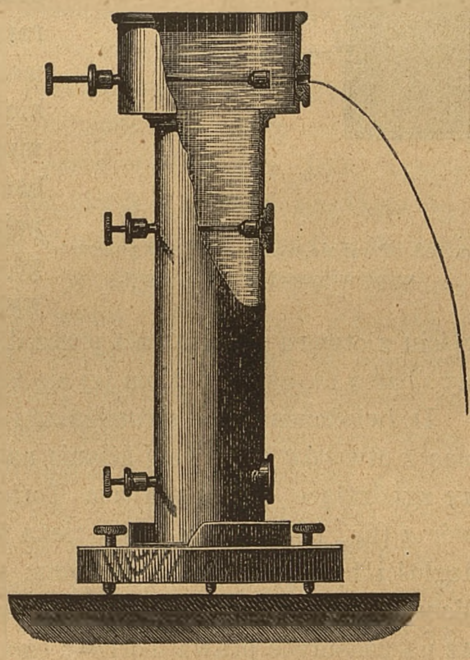


Fig. 102. Przyrząd do doświadczeń dotyczących prawa Toricelli'ego.

Zasadę Toricelli'ego można stwierdzić eksperymentalnie za pomocą naczyń, których objętość jest bardzo znaczną w stosunku do wielkości otworu tak, ażeby wypływ cieczy możliwie mało obniżał jej poziom. Same zaś otwory powinny być zrobione w nader

cienkich blaszkach metalowych, które przykłada się do odpowiednio wydrążonych części ściany bocznej lub dna; gdyby bowiem otwory znajdowały się w grubej ścianie, prędkość wypływu uległaby zmniejszeniu wskutek tarcia cieczy o wewnętrzne ścianki otworu. Figura 102 (str. 135) przedstawia właśnie przyrząd, nadający się dobrze do rzeczonego celu. W górnej części naczynia, na wewnętrznej jego ścianie, znajduje się kreska, do której dochodzi poziom cieczy. Na odległości jednego, czterech i dziewięciu decymetrów pod tą kreską znajdują się otwory, dające się zamykać przez małe tłoki, pokryte kauczukiem, które można dowolnie naciskać na otwory (otwór środkowy), lub też je od nich odsuwać (otwór górny). Zamiast otworów, przedstawionych na figurze, przez które ciecz wypływa w kierunku poziomym, naczynie może być zaopatrzone w krótkie rurki o otworach skierowanych do góry, co pozwala badać także własności wstępującego strumienia. W razie gdy chcemy, ażeby prędkość wypływającej cieczy przy wyjściu z otworu pozostawała przez dłuższy czas jednakową, musimy dbać o to, ażeby poziom jej się nie obniżał.

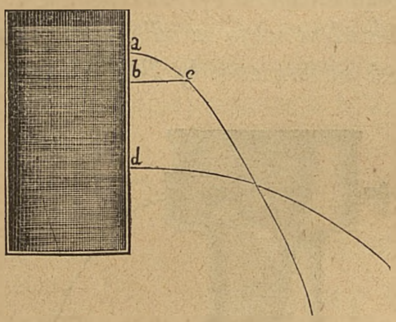


Fig. 103. Parabole, opisywane przez poziomo wypływające strumienie cieczy.

Doświadczenia nad strumieniami cieczy, wypływającemi poziomo z otworów w bocznej ścianie naczynia, dają rezultaty, dobrze zgadzające się z prawem Toricelli'ego. Przypuśćmy, że otwór *a* (fig. 103), przez który ciecz wypływa, znajduje się na odległości 1 decymetra od poziomu; wtedy prędkość wypływu, obliczona na podstawie przyśpieszenia dla danego miejsca (9,8) oraz na podstawie prawa Toricelli'ego, wynosi 1,4 metra na sekundę. Innemi słowy, gdyby cząstki cieczy, po wyjściu z otworu *a*, poruszały się jedynie z prędkością nabytą wskutek spadku, znalazłyby się po upływie jednej sekundy na odległości 1,4 metra od tegoż otworu, mierząc w kierunku poziomym; po upływie zaś $^1/_{10}$

sekundy—na odległości 10 razy mniejszej, t. j. równej 0,14 m.; po upływie $^2/_{10}$ sek. na odległości 0,28 m. i t. d. Cząstki owe poruszałyby się więc w kierunku poziomym z jednostajną prędkością, równą tej, jaką posiadają przy wyjściu z otworu. Lecz na wypływające cząstki cieczy nie przestaje działać siła ciężkości, wskutek czego spadają one także w kierunku pionowym tak, że po upływie jednej sekundy, licząc od początku wypływu, znalazłyby się na odległości 4,9 m. od otworu (¹); po $^1/_{10}$ sekundy spadną one tylko na $^1/_{100}$ poprzedniej wielkości (²), t. j. na 0,049 metra, po $^2/_{10}$ sekundy—na 0,196 m. i t. d. Jeżeli przeto od otworu *a* (fig. 103) odłożymy długość *a b* równą 0,049 m. (droga cząstki przebyta w ciągu $^1/_{10}$ sekundy w kierunku pionowym) i z punktu *b* poprowadzimy linię *b c*, ta ostatnia przetnie strumień cieczy na odległości 0,14 m. (droga cząstki przebyta w ciągu $^1/_{10}$ sek. w kierunku poziomym). Stosunek dróg pionowej do poziomej, przebywanych w jednym i tym samym czasie, pokazuje, że strumień wypływającej cieczy przedstawia krzywą, zwaną *parabolą*, której kształt, jak zaraz zobaczymy, zależy od prędkości wypływu. Gdy ciecz wypływa przez otwór *d* (fig. 103), leżący 4 razy głębiej pod poziomem, niż otwór *a*, wtedy prędkość wypływu jest 2 razy większa, niż w poprzednim wypadku, to znaczy, że każda cząstka przebywa w ciągu $^1/_{10}$ sekundy poziomą drogę, równą $2 \times 0,14$, t. j. 0,28 metra. Jeżeli tedy z punktu *d* opuścimy pionową, równą 0,049 metra i ze spodka tej pionowej poprowadzimy poziomą, ta ostatnia przetnie strumień dopiero na odległości 0,28 metra. Widzimy tedy, że parabola, opisywana przez poziomo wypływający strumień, jest tem bardziej płaską, im większą jest prędkość wypływu, a więc im głębiej dany otwór leży pod poziomem cieczy. Chcąc przekonać się, że wypływający strumień istotnie opisuje parabolę, zgodną z wymaganiami teoryi, należy narysować na papierze krzywą tę według obliczonej pręd-

---

(¹) Taką bowiem drogę przebywa ciało, swobodnie spadające w ciągu pierwszej sekundy (patrz str. 27).

(²) Drogi bowiem, przebywane podczas spadku, są wprost proporcyonalne do kwadratów z czasu (patrz str. 27).

kości wypływu dla danej głębokości otworu i umieścić ten papier po za wypływającym strumieniem, a wtedy zobaczymy, że ten ostatni pokrywa narysowaną na papierze parabolę. Figura 104 przedstawia parabole, opisywane przez strumienie, znajdujące się pod ciśnieniem słupów cieczy, wysokich na 1 decymetr (parabola *R*) i na 4 decymetry (parabola *S*).

Co do strumieni, wypływających w kierunku pionowym, powinny one—na mocy prawa, że ciała spadając, nabywają takiej prędkości, iż mogą napowrót wznieść się do wysokości spadku—wznieść się aż do poziomu cieczy w naczyniu. Doświadczenie

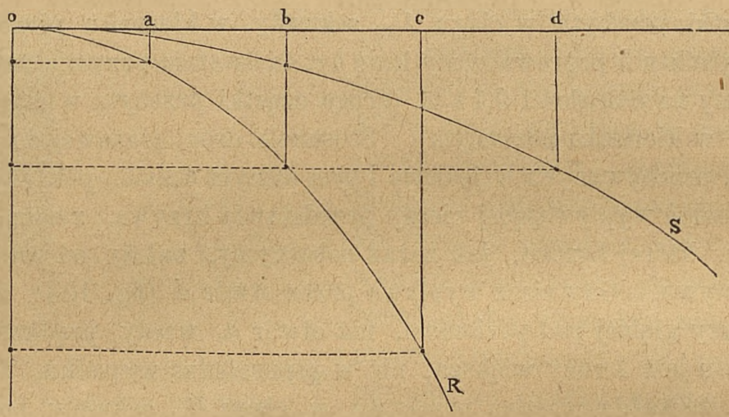


Fig. 104. Ilustracya prawa Toricelli'ego (parabole mają $1/_{10}$ istotnej wielkości).

jednak przekonywa, że tak nie jest, a to dla powodów, wyłuszczonych już przy opisie naczyń połączonych (patrz str. 95).

Przy wyprowadzaniu wniosków z prawa Toricelli'ego przyjmowano, że cząstki cieczy, znajdujące się na zewnątrz słupa, leżącego bezpośrednio nad otworem, przenikają do tego słupa stopniowo i bez wszelkiego tarcia. W rzeczywistości jednak cząstki te, dążąc z boków ku otworowi, przeszkadzają ruchowi cząstek, spadających w kierunku pionowym, wskutek czego prędkość wypływu zmniejsza się i strumień ulega zwężeniu w miarę oddalania się od otworu tak, że w pewnej odeń odległości średnica strumienia wynosi tylko $2/_3$ średnicy samego otworu. To zwężenie strumienia ma wielkie znaczenie przy obliczaniu t. zw. *ilości wy-*

pływu czyli objętości cieczy, wypływającej w ciągu jednostki czasu. Teoretycznie ilość ta jest proporcyonalną do średnicy otworu oraz do prędkości wypływu, na mocy czego łatwo jest obliczyć ilość wypłyniętej cieczy w ciągu określonego czasu. Praktycznie jednak objętość wypłyniętej cieczy nie zgadza się z teoretycznie obliczoną, jest bowiem od niej mniejsza, a to wskutek owego zwężenia strumienia. Należy dodać tutaj, że gdy ilość wypływu ma pozostać stałą, prędkość wypływu powinna być w stosunku odwrotnym do średnicy otworu, z czego wynika, że przy małym otworze, ilość wypływu może być nader nieznaczna, pomimo wielkiej prędkości strumienia; naodwrót możemy otrzymać znaczną ilość cieczy, wypływającej z małą wprawdzie prędkością, lecz przez duży otwór. Jeżeli otwór zaopatrzymy w krótką rurę walcowatą, mającą taką samą co i on średnicę, wtedy cząstki cieczy, leżące na zewnętrznej stronie strumienia, ulegają przyciąganiu wewnętrznych ścianek rury, zwilżanej przez daną ciecz. Cząstki te biegną równolegle do osi rury, nie przeszkadzając sobie wzajemnie, a wypływający strumień nie przedstawia zjawiska zwężenia. Dlatego też ilość wypływu jest większa wtedy, gdy do otworu dodaną jest rura walcowata, aniżeli gdy otwór jest swobodny. Znaleziono, że przy użyciu takiego dodatku, ilość wypływu jest tylko o $^1/_{10}$ mniejszą od tej, jaka wynika z prawa Toricelli'ego.

ROZDZIAŁ IX.

Działanie ciężkości na ciała gazowe.

§ 1. Własności gazów.

Stała ziemia, zamieszkana przez nas, przedstawia poniekąd dno obszernego oceanu, otaczającego całą kulę ziemską; ocean ten, którego głębokość jest co najmniej sto razy większa od średniej głębokości morza, jest utworzony przez bardzo ruchliwy i rzadki płyn. Ten ostatni, zwany atmosferycznem powietrzem, stanowi mięszaninę kilku ciał gazowych, pomiędzy któremi tlen i azot

zajmują najważniejsze miejsce. Oprócz nich, w powietrzu prawie zawsze znajduje się kwas węglany, para wodna, amoniak i inne gazy, lecz ilość tych ciał jest tutaj zwykle dość małą i bardzo zmienną. Natomiast stosunek ilości głównych składników, mianowicie tlenu i azotu jest stały: w 100 jednostkach objętości powietrza znajdujemy zawsze 21 jednostek tlenu i 79 azotu.

Wiadomo, że powietrze jest niezbędne dla wszystkich istot żyjących, u których ono podtrzymuje proces oddychania, mający pierwszorzędne dla życia znaczenie; nawet zwierzęta, zamieszkujące wody, nie mogą istnieć bez powietrza. Również i rośliny pobierają z powietrza znaczną część swego pożywienia, pod wpływem bowiem słońca rozkładają pochłonięty kwas węglany, przyczem zatrzymują węgiel, wydzielają zaś tlen, z kolei potrzebny do utrzymania życia zwierząt.

Ponieważ powietrze jest bardzo przezroczyste, nie możemy za pomocą wzroku przekonać się o jego obecności, z wyjątkiem gdy ono przedstawia bardzo grubą warstwę. Gdy spoglądamy na bardzo odległe przedmioty, naprzykład na góry, ograniczające nasz horyzont, wydaje nam się, jak gdyby przed niemi znajdowała się niebieska zasłona; to niebieskie zabarwienie staje się o wiele intensywniejszem, gdy patrzymy po przez atmosferę w przestrzeń wszechświata. Powietrze nadaje sklepieniu niebieskiemu jego przepyszny błękit, bez powietrza wydawałoby się ono nam bezbarwnem, albo raczej absolutnie czarnem i nawet podczas dnia gwiazdy przedstawiałyby się na tem ciemnem tle jako błyszczące punkty. Gdy dzienne światło gaśnie, powietrze jest oświecone tylko przez słabe światło księżyca i gwiazd, a wtedy barwa jego jest ciemno-niebieską.

Istnienie powietrza ujawnia się lepiej za pomocą zjawisk, dostępnych dla naszych zmysłów słuchu i dotyku. Gdy podczas zupełnego spokoju powietrza wykonywamy pewne ruchy, czujemy opór, jaki ono nam stawia; odczuwamy je również przy oddychaniu, dzięki prądowi wchodzącemu lub wychodzącemu, który muska nasze wargi i inne części ust. Nakoniec czujemy obecność powietrza wskutek ruchu, w jakim ono ciągle prawie się znajduje, ruchu polegającym bądź na lekkim przewiewie przez otwarte

okno, bądź na słabym wiaterku, zaledwie muskającym liście drzew, bądź w końcu na najgwałtowniejszej burzy lub najsilniejszym orkanie. Wreszcie drgania dźwięczącego ciała przenoszą się na powietrze, przez które dochodzą aż do naszego ucha, gdzie wywołują wrażenie dźwięku; zobaczymy w drugiej księdze, że przy odpowiednich warunkach, niewielka masa powietrza może być wprawiona w drgania, przyczem powstaje dźwięk.

Że powietrze, równie jak i inne gazy, jest istotnie ciałem fizycznem, dowodzi jego ciężar. Wkrótce poznamy bardzo ważny przyrząd, zwany pompą powietrzną, za pomocą którego można z danej przestrzeni częściowo przynajmniej wydalić powietrze, który więc pozwala otrzymać przybliżoną próżnię, tymczasowo zaś pokażemy, w jaki sposób przyrząd ten może pośrednio służyć do określenia ciężaru powietrza i innych gazów. Jeżeli za pomocą tego przyrządu wypompujemy powietrze z balonu, zaopatrzonego w odpowiednią rurkę z kranem (fig. 105), a następnie, po zamknięciu krana, zawiesimy balon na jednej szalce wagi, łatwo będziemy mogli dowieść ciężaru powietrza. W tym celu należy, po zrównoważeniu wagi, otworzyć kran i wpuścić napowrót powietrze do balonu; zobaczymy, że wtedy drąg wagi pochyli się w stronę balonu, co dowodzi, że ciężar jego się powiększył i to jedynie wskutek ciężaru powietrza, które doń weszło. Podobne doświadczenie, wykonane po raz pierwszy przez wynalazcę pompy powietrznej, Ottona von Guericke, pozwoliło obliczyć, że litr

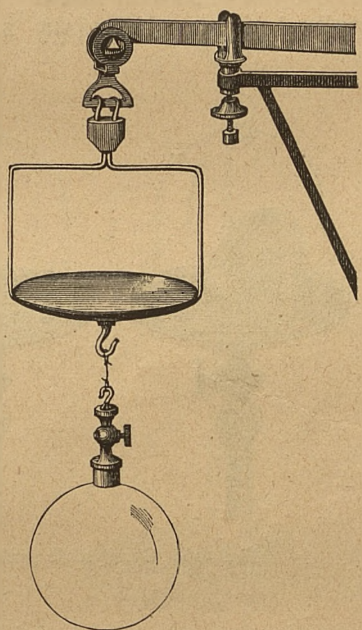


Fig. 105. Doświadczenie, służące do wykazania ciężaru powietrza.

powietrza, znajdującego się pod ciśnieniem 1 atmosfery (1), waży 1 gr., 293, a więc że gęstość jego jest 773 razy mniejszą od gęstości wody. Wpuszczając do balonu inne gazy, można w taki sam jak powyższy sposób określić ich ciężar.

Widzimy tedy, że powietrze i wszystkie podobne ciała ulegają, podobnie jak ciała stałe i ciekłe, działaniu siły ciężkości. Drugą własnością gazów, zbliżającą je do cieczy, jest wielka ruchliwość ich cząstek, dzięki której, z łatwością ulegają zmianie kształtu i nie przedstawiają znacznego oporu poruszającym się w nich ciałom. Powiedzieliśmy już, że niektóre prawa, wynikające z wielkiej tej ruchliwości cząstek, stosują się do wszystkich w ogóle płynów, tak do cieczy, jak i do gazów. Tu należy naprzykład prawo Pascala, które w zastosowaniu do gazów orzeka, *że ciśnienie, wywierane na zamknięty ze wszech stron gaz, rozchodzi się jednostajnie po przez całą jego masę.*

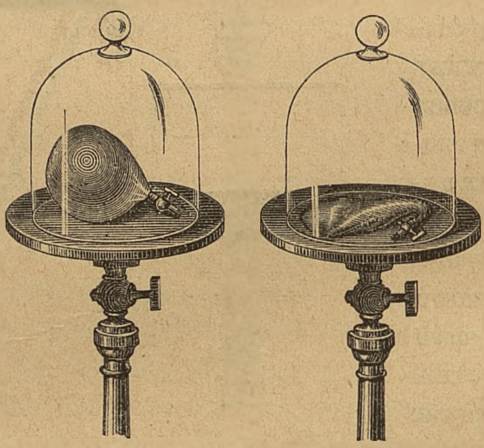


Fig. 106. Sprężystość gazów.

Własnościami, ściśle odróżniającemi gazy od cieczy, są: ich znaczna *ściśliwość* i *rozszerzalność;* innemi słowy, gazy są bardzo sprężyste. Wpuśćmy do pęcherza niewielką ilość powietrza, zamknijmy go szczelnie kranem i umieśćmy pod kloszem pompy powietrznej, wypełnionym przez powietrze; zobaczymy, że pęcherz ma wtedy postać skurczoną i zmiętą (fig. 106, strona prawa). W miarę jednak wypompowywania powietrza z klosza, powietrze, zawarte w pęcherzu rozszerza się stopniowo (albowiem ciśnienie

(1) Patrz niżej str. 147.

nań z zewnątrz słabnie coraz bardziej), przyczem sam pęcherz się wydyma i przyjmuje postać kulistą (fig. 106, strona lewa), a w końcu może nawet—jeżeli ścianki jego nie są dosyć wytrzymałe—pęknąć. Po otworzeniu krana pompy i wpuszczeniu powietrza do klosza, pęcherz przyjmuje pierwotną swą objętość. Stare zmarszczone jabłka, będąc umieszczone pod próżnym kloszem pompy powietrznej, odzyskują swój świeży wygląd, zwietrzałe zaś piwo poczyna w tych warunkach pienić się; powietrze, zawarte w jabłkach lub w piwie, rozszerza się, gdy ciśnienie zewnętrzne słabnie. Doświadczenie *z krzesiwem pneumatycznem* (fig. 107) również dowodzi sprężystości powietrza. Składa się ono z dokładnie wyszlifowanej, zamkniętej od dołu rury szklanej, w której może poruszać się szczelnie przystający tłok. Posuwając ten ostatni ku dołowi, ściskamy powietrze, zawarte w rurze, przez co możemy zredukować jego objętość do połowy, jednej trzeciej, czwartej i t. d. części; szybko i silnie ściśnięte powietrze rozgrzewa się dosyć mocno tak, że kawałek hubki, umieszczony na podstawie tłoka, zapala się. Przy spychaniu tłoka można zauważyć, że im mniejszą jest objętość ściśniętego powietrza, tem większy napotykamy opór przy dalszem ściskaniu, co dowodzi, że dążność do rozszerzania się gazu wzrasta w miarę zajmowania coraz mniejszej przestrzeni; gdy puszczamy tłok, powietrze rozszerzając się, pcha go do góry.

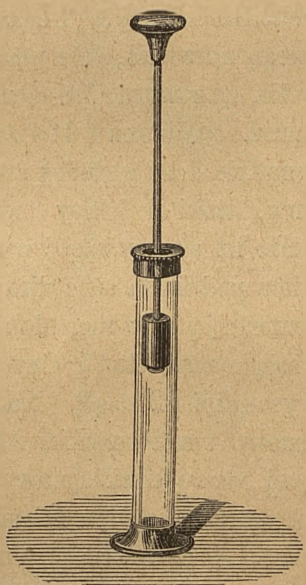


Fig. 107. Krzesiwo pneumatyczne.

W końcu gazy różnią się od cieczy pod względem swej gęstości; podczas gdy waga jednego litra (decymetra sześc.) cieczy waha się pomiędzy 715 gr. (eter) i 13596 gr. (rtęć), największa podobna wartość dla ciał gazowych dochodzi do 11 gr. (chlorek cyny), najniższa zaś spada do 0 gr, 09 (wodór).

§ 2. Ciśnienie powietrza.

Powróćmy obecnie do ciężaru powietrza i wynikającego ztąd ciśnienia.

W najdawniejszych już czasach znano pompy i używano ich do podnoszenia wody z głębszych warstw ziemi na jej powierzchnię; wiedziano również, że gdy otwartym końcem zanurzymy w wodzie rurę, w której tłok porusza się ku górze, wtedy woda wchodzi do rury. Lecz gdy przyszło do objaśnienia tego ostatniego zjawiska, nie umiano go sobie inaczej wytłómaczyć, jak tylko, że natura, nie cierpiąc próżni, stara się zawsze takową wypełnić. W roku 1640 zdarzyło się atoli, że we Florencyi miano urządzić dość głęboką studnię; pomimo iż robotnicy przygotowali rury, tłoki i klapy według wszelkich prawideł sztuki, nie udało im się wydobyć wody na powierzchnię ziemi, ciecz ta bowiem podniosła się tylko do wysokości około 32 stóp, wyżej zaś wznieść ją było niepodobieństwem. Jak objaśnić sobie to zadziwiające zjawisko? Czy wstręt natury do próżni sięga tylko do wysokości 32 stóp? Nadaremnie zwracano się z zapytaniem do uczonych z florenckiej Akademii—nikt nie umiał dać zadawalniającej odpowiedzi, a nawet sławny ze swej nauki Galileusz, wtedy już starzec siedemdziesięciosześcioletni, dał odpowiedź wymijającą. Lecz przedmiot ten interesował ślepego starca, który w najpóźniejszym wieku kusił się jeszcze o rozwiązanie zagadnień mechaniki; wkrótce też niepospolity badacz przyrody wpadł na myśl, że i powietrze zapewne ulega sile ciężkości i że dzięki ciśnieniu, jakie wskutek tego wywiera na wodę, ta ostatnia podnosi się w opróżnionej rurze studziennej. Chcąc dowieść ciężaru powietrza, starał się on wywołać próżnię we flaszce, w której gotował nieco wody i którą następnie mocno zakorkowywał; w taki sposób udało mu się wykazać, że flaszka, po wyjęciu korka, a więc po wpuszczeniu do niej powietrza, stawała się cięższą. Dalsze badania zmuszony był jednak pozostawić uczniowi swemu Toricelli'emu, któremu, w rok po śmierci Galileusza, udało się określić wielkość ciśnienia powietrza, a to za pomocą następującego

doświadczenia. Wychodząc z założenia, że ciśnienie powietrza powinno podnosić rtęć, trzynaście i pół razy cięższą od wody, do wysokości tyleż razy mniejszej, Toricelli napełnił rtęcią zamkniętą u dołu rurę szklaną, mającą około 30 cali długości i zatkawszy otwarty koniec palcem, odwrócił ją do góry (fig. 108). Następnie zatkany koniec zanurzył w naczyniu z rtęcią i ostrożnie odjąwszy palec, zatrzymał rurę w położeniu pionowem (fig. 109, str. 146). Poziom rtęci w rurze natychmiast się obniżył i po kilku wahaniach zatrzymał na wysokości, równej 28 calom czyli 76 centymetrom, licząc od poziomu rtęci w naczyniu. Przypuszczenie tedy Galileusza, że powietrze wywiera pewne określone ciśnienie, zostało w zupełności dowiedzione, doświadczenie bowiem Toricelli'ego wykazało, że istotnie słup podniesionej w rurze rtęci jest trzynaście i pół razy niższy od słupa podniesionej wody, który, jak wiemy, wynosił 32 stopy.

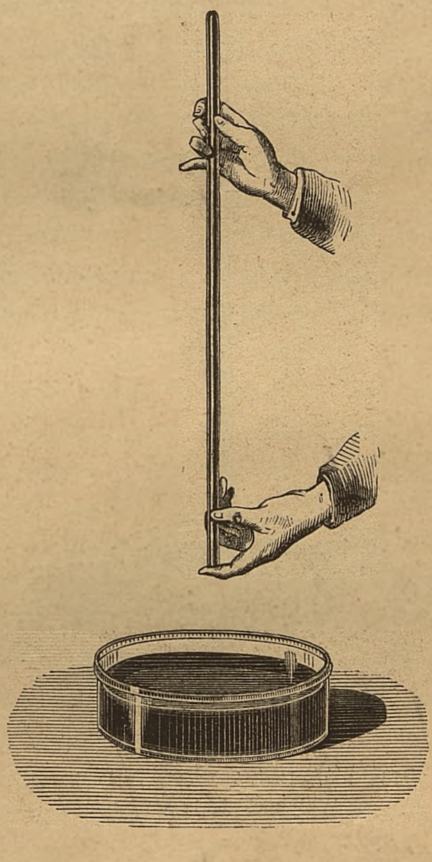


Fig. 108. Doświadczenie Toricelli'ego.

W ten sposób Toricelli wynalazł w roku 1643 najprostszą postać przyrządu, zwanego barometrem i służącego do oznaczenia ciśnienia powietrza czyli ciśnienia atmosferycznego. W trzy lata potem Pascal użył takiego samego przyrządu do obmyślonego przezeń doświadczenia, którego rezultaty nie pozostawiają żadnej wątpliwości. Jeżeli, sądził on, ciśnienie powietrza jest istotną przyczyną pod-

noszenia się rtęci w rurce barometrycznej, to słup tej cieczy powinien obniżyć się w razie, gdy udamy się z rurką do miejsca wyżej położonego, wtedy bowiem będzie ciążyła nad nami mniejsza ilość powietrza. W celu stwierdzenia słuszności tej myśli, Pascal i szwagier jego Perier jednocześnie obserwowali stan barometru u podstawy i na wierzchołku góry Puy de Dôme, mającej 4,700 stóp wysokości, a rezultaty tych obserwacyj okazały się najzupełniej zgodne z teoryą Galileusza i Toricelli'ego. W istocie bowiem słup rtęci w rurce barometrycznej obniżał się w miarę wznoszenia się do wyższych warstw atmosfery tak, że od podstawy góry do jej wierzchołka obniżenie to wynosiło trzy cale czyli osiem centymetrów. Doświadczenia te stanowiły punkt wyjścia dla bardzo ważnego zastosowania barometru, a mianowicie do mierzenia wysokości gór; do przedmiotu tego powrócimy jeszcze później.

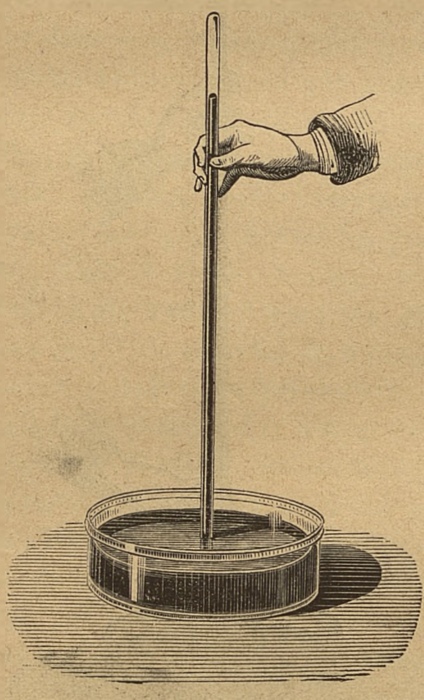


Fig. 109. Doświadczenie Toricelli'ego. Wpływ ciśnienia powietrza.

Na podstawie prawa o jednostajnem rozchodzeniu się ciśnienia w cieczach, można łatwo dowieść, że wysokość rtęci w rurce Toricelli'ego nie zależy od szerokości tej ostatniej, z wyjątkiem gdy jest ona włoskowatą. Wiemy, że ciecz wtedy znajduje się w stanie równowagi, gdy ciśnienia, wywierane na każdy jednakowy element jej powierzchni, są równe. Warunkowi temu staje się zadosyć w doświadczeniu Toricelli'ego: na każdy element powierzchni rtęci, zawartej w naczyniu (fig. 109), równy poprzecznemu przekrojowi rurki,

działa albo ciśnienie powietrza atmosferycznego, albo też dokładnie równe mu ciśnienie słupa rtęci, zawartego w rurce. Gdyby ta ostatnia była dwa razy szersza, dwa takie elementy znajdowałyby się pod ciśnieniem słupa rtęciowego, lecz wysokość jego pozostałaby taką samą. Jak powiedzieliśmy wyżej, wyjątek zachodzi wtedy, gdy rtęć znajduje się w rurce włoskowatej: w warunkach takich obniża się ona nieco albo podnosi (patrz Roz. VII).

Ciśnienie atmosferyczne działa z jednakową mocą na każdy punkt powierzchni ziemi i wszystkich w ogóle ciał; działa ono tak samo, jak warstwa rtęci, gruba na 76 centymetrów. Ciśnienie to rozchodzi się po całej masie powietrza atmosferycznego i przenosi się do wszystkich przestrzeni, będących z niem w związku. Jeżeli tedy mieszkania nasze nie są hermetycznie zamknięte, lecz są w jakikolwiek sposób, naprzykład za pośrednictwem dziurki od klucza lub rury kominowej, połączone z otwartem powietrzem, ciśnienie jego w tych mieszkaniach jest tak samo wielkie, jak na zewnątrz nich. Innemi słowy, w tem samem miejscu na ziemi i w tym samym czasie, wysokość słupa rtęci w rurce barometrycznej,—bez względu na to, czy znajduje się ona w pokoju lub pod gołem niebem—jest jednakową. Obliczywszy wielkość ciśnienia atmosferycznego, wywieranego na metr kwadratowy powierzchni, otrzymujemy ciężar słupa rtęci, którego podstawa równa się 1 m. kw., wysokość zaś—76 centymetrom; objętość tego słupa równa się 760 decymetrom sześciennym czyli litrom, a że litr rtęci waży 13 kilogr., 596, przeto ciśnienie na każdy metr kwadratowy wynosi 10333 kilogr. (1) Jestto ciśnienie *jednej atmosfery*.

Ciśnienie to, jak widzimy, jest ogromne, a w obec tego słusznie zapytać możemy, dlaczego przedmioty, ulegające mu, nie załamują się pod niem? Oto poprostu dlatego, że powietrze ciśnie na nie ze wszech stron z jednakową mocą i przeto naprzykład ciśnienia, wywierane zewnątrz i wewnątrz wydrążonego przedmiotu, znoszą się wzajemnie. Nasze własne cialo, powierzchnia

---

(1) Ztąd łatwo już obliczyć wielkość tego ciśnienia na każdą inną jednostkę powierzchni: naprz. na 1 cent. kw. ciśnienie to wynosi 1 kilogr., 0333.

którego wynosi średnio $1\frac{1}{2}$ metra kwadratowego, ulega ciśnieniu atmosferycznemu, równemu ciężarowi 15,500 kilogramów, lecz ciśnienie to, będąc jednostajnie rozmieszczone po całej powierzchni ciała, znosi się wzajemnie tak, że nie jesteśmy przezeń popychani w żadnym kierunku. Pozostaje tylko pytanie, dlaczego my ciśnienia tego nie czujemy i dlaczego ciało nasze nie ulega ściśnieniu. Oto dlatego, że wewnętrzne jamistości naszego organizmu wypełnione są gazami lub cieczami, które cisną od wnętrza na zewnątrz i przeciwdziałają ciśnieniu powietrza atmosferycznego. Że takie wewnętrzne ciśnienie istnieje, widzimy to z działania baniek: gdy niewielkie te naczynia, po uprzedniem rozrzedzeniu w nich powietrza, przystawiamy do skóry, ta ostatnia wzdyma się pod niemi, małe jej naczyńka krwionośne pękają wypuszczając krew, której nie tamuje już ciśnienie powietrza zewnętrznego.

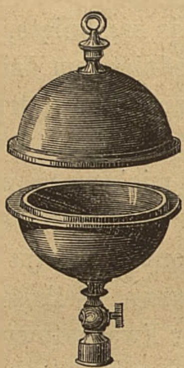
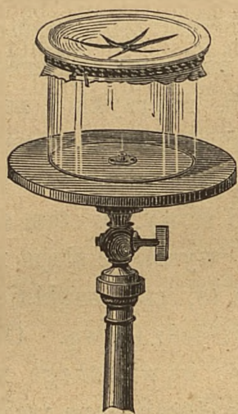


Fig. 110. Ciśnienie powietrza. Półkule magdeburskie.



Fig, 111. Ciśnienie powietrza. Pękanie błony.

Wpływ ciśnienia atmosferycznego można uwidocznić za pomocą licznych doświadczeń, z których przytoczymy kilka. Jedno z najdawniejszych zostało po raz pierwszy wykonane przez burmistrza magdeburskiego Ottona von Guericke w r. 1654. Polega ono na tem, że dwie wydrążone metalowe półkule, mogące bardzo szczelnie przystawać do siebie (fig. 110), składa się w ten sposób, ażeby stanowiły jednę kulę, z której następnie wypompowywa się powietrze. Po zamknięciu krana, przepuszczającego powietrze, potrzeba, nawet przy małej kuli, użyć dość znacznej siły, ażeby oderwać od siebie dwie jej połowy. Guericke złożył półkule, mające 65 centymetrów w średnicy i, po wypompowaniu z nich po-

wietrza, zaprzągł do każdej z nich po cztery silne konie, które jednak nie były w stanie oderwać półkuli jednej od drugiej, innemi słowy, nie mogły przezwyciężyć ciśnienia atmosferycznego, któremu w danym razie nie przeciwdziałało ciśnienie od wewnątrz.

Inne znowu doświadczenie polega na tem, że na podstawce pompy powietrznej ustawia się walcowate naczynie szklane, zamknięte u góry przez naciągniętą błonę (fig. 111, str. 148), która nie przepuszcza powietrza. Gdy następnie z naczynia wypompowywa się powietrze, błona wpukla się do wnętrza i w końcu pęka pod naciskiem atmosferycznego powietrza, które z ogromnym hukiem wpada do naczynia. Doświadczenie to można zmodyfikować w ten sposób, że na górnej zaostrzonej krawędzi podobnego, lecz nieco mniejszego naczynia, umieszcza się jabłko, które będąc wciskane przez powietrze atmosferyczne, zostaje przytem przekrojone. Następujące zaś doświadczenie uwidocznia wpływ ciśnienia atmosferycznego na powierzchnię wody. Wypompowywa się powietrze ze szklanego klosza, szczelnie przylutowanego do talerzyka, przez środek którego przechodzi rurka, zamknięta kranem (fig. 112); rurka ta ostrym górnym końcem wchodzi do wnętrza klosza, dolnym zaś zanurza się w naczyniu z wodą. Po otwarciu krana, woda z naczynia zostaje gwałtownie wciśnięta

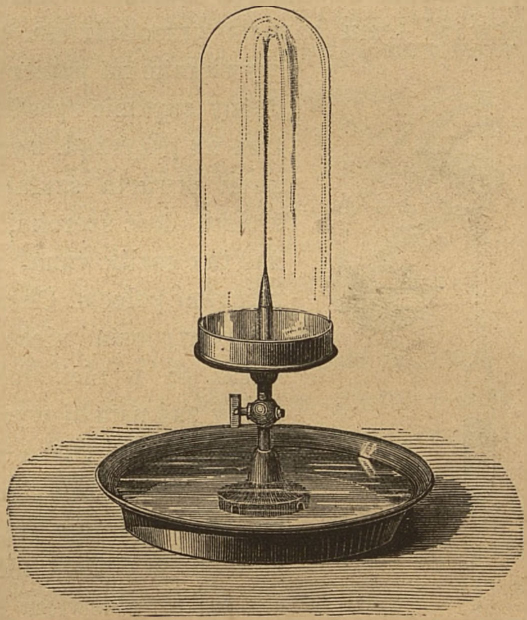


Fig. 112. Ciśnienie powietrza. Fontanna, bijąca w rozrzedzonem powietrzu.

do rurki i wytryskuje z niej w postaci strumienia, bijącego o sklepienie klosza. W końcu przytoczymy jeszcze pewne, bardzo proste doświadczenie, które każdy z łatwością może powtórzyć; jest ono o tyle odmienne od poprzednich, że dowodzi ciśnienia powietrza z dołu do góry. Napełnia się mianowicie szklankę wodą aż po brzegi, nakrywa tę ostatnią ćwiartką papieru, który należy silnie przycisnąć i odwraca szklankę dnem do góry; wtedy, nawet po odjęciu ręki od papieru, ten ostatni nie odpada, pomimo iż cały ciężar wody, zawartej w szklance, ciśnie nań z góry na dół,— ciężarowi temu bowiem przeciwdziała ciśnienie atmosferyczne, wywierane na papier z dołu do góry. W podobny zupełnie sposób działa ciśnienie powietrza na przyrząd, zwany *pipetą*. Jestto z obu stron otwarta szklana rurka (fig. 113), pośrodku dość szeroka, u dołu wązka, u góry zaś tak oszlifowana, że z łatwością daje się zamykać palcem. Chcąc za pomocą tego przyrządu wydostać nieco cieczy z naczynia, zanurza się w niej dolny jego koniec, przez górny zaś ustami wyciąga zeń powietrze tak długo, dopóki rurka nie napełni się dostatecznie; wtedy zamyka się górny otwór rurki palcem i wyjmuje przyrząd z naczynia. Ciecz zawarta w pipecie nie wypłynie aż po odjęciu palca, albowiem powietrze ciśnie na nią od dołu; wypływ zaś cieczy z rurki można dowolnie zatrzymać, przykładając napowrót palec do górnego jej otworu.

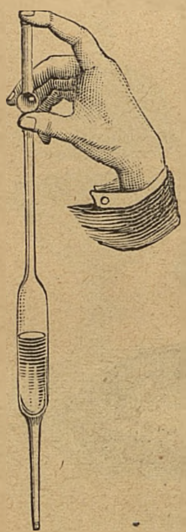


Fig. 113. Pipeta.

§ 3. Barometry.

Dotychczas przypuszczaliśmy, że ciśnienie powietrza jest wielkością stałą i że równa się ciśnieniu słupa wody, mającego $10\frac{1}{3}$ metra wysokości, albo słupa rtęci wysokości 76 centymetrów. Doświadczenie wszakże wykazało, że ciśnienie to zmienia się nietylko w różnych miejscach na ziemi, lecz także w jednem

i tem samem miejscu w różnych czasach. W ostatniej księdze niniejszego dzieła zajmiemy się bliższem zbadaniem związku, zachodzącego pomiędzy zmianami ciśnienia atmosferycznego a innemi zjawiskami powietrznemi, obecnie zaś zwrócimy się do opisu przyrządu, który pozwala oznaczać te wahania w wielkości ciśnienia; jestto tak zwany *barometr*, wynaleziony jeszcze przez Toricelli'ego. Zobaczymy, jakie kształty nadano temu przyrządowi w celu uczynienia go możliwie dla nas pożytecznym, oraz jakie zastosowano doń środki ostrożności, ażeby wskazówki jego były dokładne.

Najprostsza forma przyrządu, mianowicie taka, jaką się posługiwał Toricelli w swem doświadczeniu, pozostała zarazem formą typową. Wybiera się rurki szklane dość szerokie, mające 2 do 3 centymetrów w średnicy i możliwie proste; rurkę i naczynie przymocowuje się do płyty, którą zawiesza się w miejscu, wolnem od wszelkich wstrząśnień. Rtęć, użyta do barometru, musi być bardzo czysta, dlatego też należy ją, za pomocą rozcieńczonego kwasu azotnego, oczyścić starannie z zawartych w niej zwykle innych metali i tlenku rtęci. Oprócz tego, w rtęci nie powinny znajdować się pęcherzyki powietrza, ścianki zaś rurki muszą być wolne od wszelkiej wilgoci, albowiem gdyby powietrze i para wodna zebrały się, wskutek swej lekkości, w górnej części rurki po nad słupem rtęciowym, wywierałyby na ten ostatni ciśnienie tak, że zaobserwowana przez nas wysokość jego nie mogłaby służyć jako dokładna miara ciśnienia atmosferycznego. Zwykle tedy przed napełnieniem rurki, starannie się ją czyści i suszy, następnie zaś, po wprowadzeniu rtęci, poddaje silnemu ogrzewaniu tak, ażeby ciecz ta się zagotowała; pary rtęci uchodząc, porywają z sobą pęcherzyki powietrza, poczem sama rtęć przybiera wszędzie jednostajny blask metaliczny, co pokazuje, że jest ona już dostatecznie czysta i wolna od powietrza. Przez to, że rurka barometryczna jest dość szeroka, osiągamy tę korzyść, że zawarty w niej słup rtęciowy nie ulega obniżeniu wskutek włoskowatości i może być z całą dokładnością zmierzony.

Figura 114 przedstawia *barometr normalny*. Naczynie z rtęcią i rurka przymocowane są do drewnianej płyty; na dole

widać szrubkę, której dolny zaostrzony koniec, przed rozpoczęciem obserwacyi, wprowadza się w zetknięcie z powierzchnią rtęci w naczyniu. Odczytywanie wysokości barometrycznej odbywa się za pośrednictwem *katetometru*, to jest przyrządu, służą-

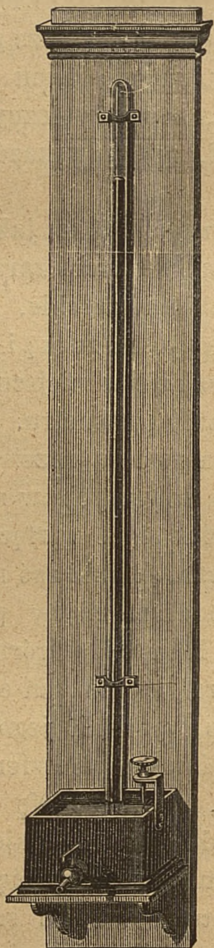


Fig. 114. Barometr normalny.

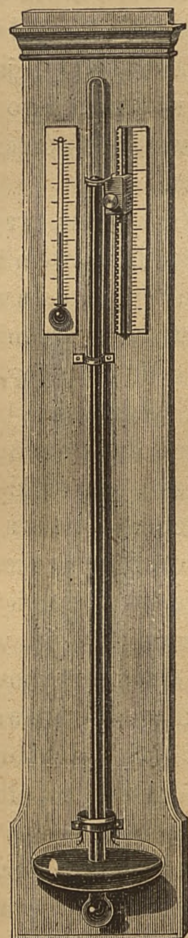


Fig. 115. Barometr naczyńkowy.

cego do bardzo dokładnego mierzenia pionowej odległości dwóch punktów; w zasadzie jestto pionowo stojący slup, podzielony na centymetry, wzdłuż którego przesuwa się luneta. Tę ostatnią skierowywa się najprzód na główkę szruby, a następnie na po-

ziom rtęci w rurce; ilość centymetrów, znajdująca się pomiędzy dwoma kolejnemi położeniami lunety, powiększona o długość samej szruby, t. j. o odległość główki od dolnego końca szrubki, stykającego się z rtęcią, daje nam wysokość barometryczną.

Barometr naczyńkowy (fig. 115, str. 152) różni się od poprzedniego pod dwoma względami. Po pierwsze, przymocowane do rurki szklane naczynie z rtęcią, jest tak szerokie, że pomimo wahań, jakim ulega słup rtęci w rurce, poziom tej cieczy w naczyniu możemy uważać za stały. Po drugie, na desce, podtrzymującej cały przyrząd, znajduje się skala, podzielona na milimetry; wzdłuż niej przesuwa się odpowiednio wydrążony kawałek metalu, do którego z kolei przymocowany jest pierścień, obejmujący samą rurkę. Pierścień ustawia się zawsze w ten sposób, ażeby górny jego brzeg znajdował się dokładnie na wysokości poziomu rtęci w rurce, ta zaś podziałka, naprzeciw której zatrzymuje się wtedy pierścień, odczytana na skali, daje nam bezpośrednio wysokość barometryczną. Rozumie się, że zero owej skali znajduje się na wysokości poziomu rtęci w naczyniu, który, jak powiedzieliśmy, uważany jest za stały. W istocie jednak poziom ten podnosi się nieco przy opadaniu rtęci w rurce, obniża się zaś przy jej podnoszeniu; oprócz tego, wskutek zmian temperatury, objętość naczynia i rurki oraz samej rtęci zmienia się tak, że przypuszczenie o stałości poziomu w naczyniu nie jest zupełnie słuszne. Dlatego też wskazówki barometru naczyńkowego nie są tak dokładne, jak wskazówki barometru poprzednio opisanego, szczególniej zaś baczną należy zwrócić uwagę na położenie zera skali, które od czasu do czasu poddawać trzeba ścisłej kontroli.

Barometr, zbudowany przez Fortin'a, jest wygodny z tego głównie względu, że daje się z łatwością przenosić z miejsca na miejsce, wskutek czego może być bardzo pożyteczny w podróży. W celu uczynienia go możliwie lekkim, Fortin musiał użyć rurki węższej, niż w normalnym barometrze, przez to jednak powiększa się wpływ włoskowatości tak, że do rezultatu każdej obserwacyi należy wprowadzić odnośną poprawkę. Figura 116 (str. 154) przedstawia w przecięciu walcowate naczynie barometru Fortin'a, zawierające rtęć; górna połowa ściany tegoż naczynia jest szklaną

tak, że można przez nią widzieć poziom rtęci. Od pokrywki naczynia schodzi do wnętrza metalowe ostrze i punkt, w którym dolny koniec ostrza styka się z rtęcią, stanowi zero skali barometrycznej, to znaczy, że do tej wysokości doprowadza się zawsze poziom rtęci w naczyniu, a to za pomocą bardzo dowcipnie obmyślonego sposobu: Mianowicie dno naczynia stanowi worek skórzany, którego położenie można regulować za pomocą szruby, przytwierdzonej do jego środka. Jeżeli wkręcamy szrubę, worek zostaje ściśnięty, przez co poziom rtęci w naczyniu podnosi się; przy przeciwnym zaś ruchu szruby, poziom ten się obniża. Przez środek pokrywki naczynia przechodzi rurka barometryczna ostro zakończona i zanurzona w rtęci; rurka i naczynie są połączone za pomocą skóry, mocno przywiązanej z jednej strony do przewężenia rurki, z drugiej zaś do wystającej ku górze części pokrywki. To połączenie, uniemożebniając wylanie się rtęci przy przewracaniu barometru, nie przeszkadza jednak działaniu ciśnienia atmosferycznego, które przenosi się bardzo dobrze po przez pory skóry na rtęć w naczyniu. Podczas podróży należy tak wkręcić szrubę, ażeby rtęć całkowicie wypełniła rurkę i naczynie; wtedy można barometr nachylać, albo nawet przewracać, nie obawiając się przytem, że wejdzie doń powietrze lub że rtęć, wskutek ruchu swego, stłucze rurkę. Cały przyrząd umieszcza się w futerale, to jest w rurze mosiężnej, chroniącej go od uderzeń; w miejscu gdzie znajduje się poziom rtęci w rurce barometrycznej, na rurze mosiężnej są zrobione dwie długie szpary, jedna naprzeciwko drugiej, ułatwiające obserwacyę. Na brzegach tych szpar wyrytą jest skala barometru. W czasie obserwacyi zawiesza się przyrząd na trójnogu, przyczem, dzięki własnemu ciężarowi, przyjmuje on położenie pionowe (fig. 117).

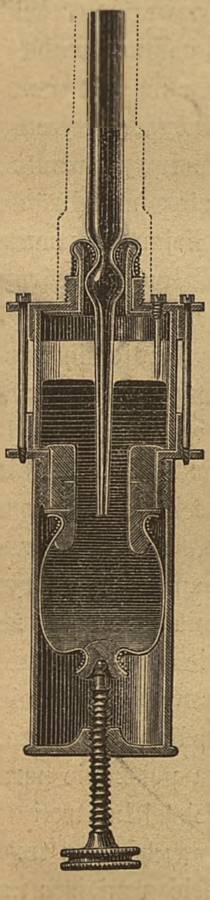


Fig. 116. Naczynie barometru Fortin'a.

Figura 118 przedstawia barometr, zbudowany przez Gay-Lussac'a. Składa się on ze szklanej rurki, zgiętej w dwa nierównej wielkości ramiona: jedno dłuższe, zamknięte u góry, napełnione jest rtęcią, jak w barometrze naczyńkowym, drugie za:—



Fig. 117. Barometr Fortin'a. Ustawienie w podróży.

krótkie, posiada z boku mały otwór i odgrywa rolę naczynia. Oczywiście, że wysokość barometryczna równa się pionowej odległości poziomów rtęci w obu ramionach. W celu łatwiejszego przenoszenia przyrządu, bez wpuszczania doń powietrza, Gay-

Lussac połączył oba jego ramiona za pomocą rurki włoskowatej (fig. 119). Przy przewracaniu barometru, rurka ta wskutek swej włoskowatości, pozostaje zawsze pełna i powietrze nie może przeniknąć przez nią do dłuższego ramienia. Gay-Lussac sądził, że, ponieważ oba ramiona rurki mają jednakową średnicę, wpływ obniżenia włoskowatego można pominąć, o ile bowiem rtęć w jednem ramieniu się obniża, o tyle też obniża się i w drugiem, pionowa więc odległość obu poziomów pozostałaby niezmienioną; niestety jednak przekonano się, że włoskowatość działa inaczej w przestrzeni, napełnionej powietrzem, a inaczej w próżni. Pomijając tę niedokładność, musimy przyrząd ten uważać za bardzo wygodny, zajmuje on bowiem mało miejsca i łatwo daje się przenosić, przyczem zawsze należy go zupełnie przewrócić.



Fig. 118. Barometr Gay-Lussac'a.

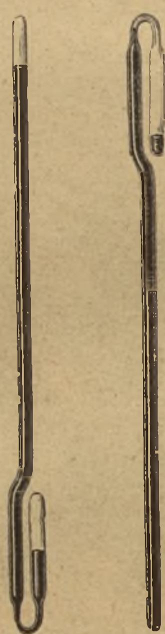


Fig. 119. Rurka w barometrze Gay-Lussac'a.

W końcu wspomnimy jeszcze o *barometrach aneroidach*, które w ostatnich latach znalazły bardzo szerokie zastosowanie i które polegają na wzajemnem działaniu ciśnienia atmosferycznego i sprężystości cienkich metalowych blaszek. Bourdon mianowicie znalazł przez obliczenie, że rurka z cienkiej blachy mosiężnej łatwo ulega wpływowi ciśnienia powietrza, gdy przecięcie jej przedstawia płaską elipsę i gdy, po wypompowaniu z niej powietrza, zegniemy ją w całkowite prawie koło. Rurkę taką, której powiększone przecięcie widać oddzielnie na rysunku (fig. 120 *S*, str. 157), Bourdon przymocował w jej środku, a oba dwa końce połączył za pomocą dwu-

ramiennej dźwigni, której ruchy udzielają się łukowi, zaopatrzonemu w zęby. Te ostatnie wchodzą z kolei pomiędzy zęby kółka, do którego przytwierdzona jest wskazówka. Całość zamknięta jest w płytkiem pudełku, na pokrywce którego znajdują się wokoło podziałki, oznaczone liczbami, odpowiadającemi wskazaniom zwykłego barometru; przed temi podziałkami posuwa się wskazówka. Gdy ciśnienie powietrza wzrasta, rurka barometru zgina się, końce jej obracają dźwignię, której ruch przenosi się na wskazówkę, ta zaś ostatnia zatrzymuje się przed podziałką, oznaczoną taką samą cyfrą jak podziałka, przy której znalazłby się poziom rtęci w zwyczajnym barometrze. Gdy ciśnienie atmosferyczne słabnie, rurka rozgina się, a wskazówka porusza się w kierunku przeciwnym. Skonstatowano, że wahania barometru ściśle zależą od zmian w kierunku wiatrów: w ogóle barometr stoi najwyżej podczas wiatru północno-wschodniego, najniżej zaś, gdy wieje wiatr południowy lub południowo-zachodni. Z kolei zmiany wiatru pozostają w ścisłym związku ze zmianą pogody tak, że w środkowej np. Europie wiatr południowo-zachodni sprowadza deszcz; wiatr północno-wschodni zaś—piękną pogodę.

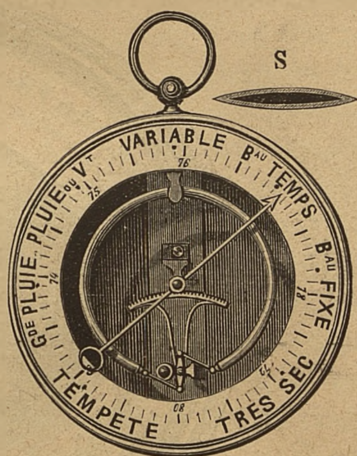


Fig. 120. Barometr-aneroid Bourdon'a.

A więc gdy barometr stoi wysoko, mamy pogodę, spadek zaś jego zwiastuje deszcz i wiatr; średnie położenie odpowiada stanowi przejściowemu. Barometr może tedy służyć do przepowiadania pogody i dlatego też często znajdujemy na nim, jak w barometrze Bourdon'a, obok podziałek, oznaczających wielkość ciśnienia atmosferycznego, napisy: piękna pogoda, zmiana, deszcz, burza, susza i t. d. W ogóle jednak te wskazówki meteorologiczne są prawdziwe tylko w pewnych bardzo niewielkich granicach. Podobnemi nazwami, przepowiadającemi stan pogody, oznaczone są podziałki innego barometru aneroidu,

zbudowanego przez Vidi'ego (fig. 121). Rurka metalowa zastąpiona jest tutaj przez pudełko, zawierające rozrzedzone powietrze; pokrywka jego zrobiona jest z bardzo cienkiej karbowanej blachy miedzianej. Ażeby ciśnienie atmosferyczne, działając na pokrywkę pudełka, nie wcisnęło jej zupełnie, umieszcza się na niej dużą sprężynę, która przeciwdziała temuż ciśnieniu. Gdy to osta-

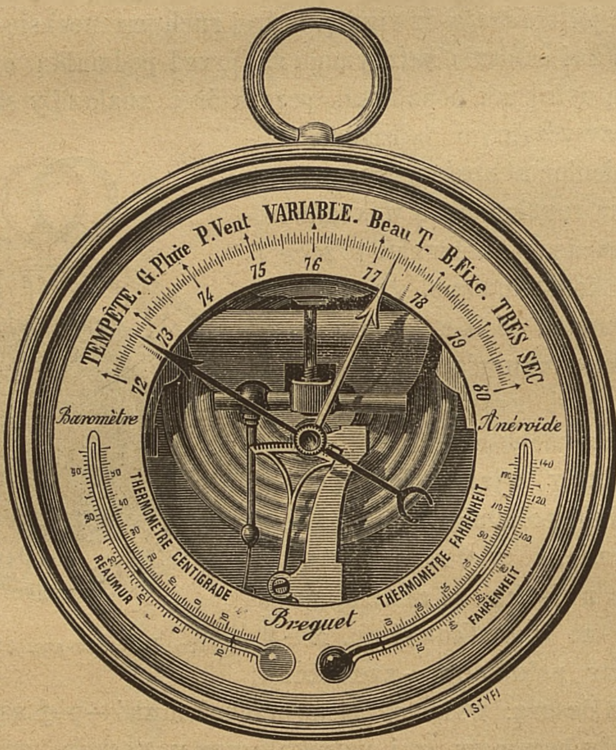


Fig. 121. Barometr-aneroid podług Vidi'ego.

tnie wzrasta, przezwycięża ono nieco elastyczność sprężyny i ściska silniej pudełko; przy zmniejszonem natomiast ciśnieniu, sprężyna pociąga pokrywkę napowrót do góry. Ruchy te przenoszą się za pośrednictwem systemu sprężyn i drążków, na wskazówkę, poruszającą się po cyferblacie.

Barometry-aneroidy przedstawiają tę wielką korzyść, że z największą łatwością dają się przenosić i są wygodne do uży-

cia. Najgorsza zaś ich strona jest ta, że sprężystość metali z czasem zmienia się nieco, wskutek czego trzeba koniecznie od czasu do czasu sprawdzać ich skale ze wskazaniami barometru normalnego.

Powiedzieliśmy wyżej, że Pascal, chcąc stwierdzić teoryę Galileusza i Toricelli'ego, wykonał doświadczenie z barometrem, które posłużyło za punkt wyjścia dla jednej z metod mierzenia wysokości gór. Otóż jeżeli wiadomo, jaki jest stosunek ciężaru właściwego powietrza w danym punkcie obserwacyjnym do ciężaru właściwego rtęci ([1]), można z tego obliczyć wysokość słupa powietrza, odpowiadającego słupowi rtęci, który równa się różnicy wysokości barometrycznych przy podstawie i na wierzchołku góry. Wiemy już, że litr powietrza przy temperaturze 0^0 i przy ciśnieniu 760 milimetrów (jedna atmosfera) waży $1^{gr.}$,23, litr zaś rtęci—13596 gramów; rtęć tedy jest 10,500 razy cięższa od powietrza przy rzeczonych warunkach ciśnienia i temperatury. Jeżeli, przy ciśnieniu 760 milimetrów, to jest średniem ciśnieniu na poziomie morza i przy temperaturze 0^0, wzniesiemy się tak wysoko, że barometr obniży się o 1 milimetr, wtedy warstwa powietrza, przez którą przeszliśmy, musi tak cisnąć, że utrzymuje w równowadze słup rtęci, wysoki na 1 milim., to znaczy, że ona sama musi mieć 10,500 milim., czyli 10^{metra},5 wysokości. W przytoczonych więc warunkach różnica stanów barometrycznych równa 1 milim., odpowiadałaby wysokości $10^{metr.}$,5.

Lecz im wyżej wznosimy się w powietrzu, tem mniejszem jest ciśnienie, a więc tem mniejszy także jest ciężar właściwy powietrza, które rozszerza się w tym samym stopniu, w jakim ciśnienie się zmniejsza ([2]); w miarę tedy wznoszenia się, potrzeba coraz grubszej warstwy powietrza do zrównoważenia 1 milimetrowego słupa rtęci. Halley i Newton pierwsi wygłosili prawo matematyczne, według którego można obliczyć różnicę w wysokości dwu punktów z różnicy długości slupów barometrycznych w tychże punktach; odnośną wszelako używaną formułę, uwzględniającą

([1]) Stosunek ten pokazuje, ile razy rtęć jest cięższa od badanego powietrza.
([2]) O związku między objętością gazu i ciśnieniem patrz niżej Roz. X, § 1.

wszystkie warunki, zawdzięczamy Laplace'owi. Nie możemy wdawać się tutaj w bliższy rozbiór tej formuły, dla zrozumienia której trzeba posiadać więcej wiadomości matematycznych, niż mamy prawo u czytelników przypuszczać.

Oprócz ciśnienia, należy jeszcze, przy omawianych tutaj obserwacyach, uwzględniać temperaturę. Pod wpływem bowiem ciepła rtęć się rozszerza i jej ciężar właściwy zmniejsza się tak, że to samo ciśnienie powietrza równoważy wyższy słup ciepłej rtęci, niż zimnej, dlatego też przy barometrze znajduje się zwykle przyrząd do mierzenia temperatury czyli termometr, według wskazówek którego robi się odpowiednią poprawkę. Powietrze, będąc ogrzewane, rozszerza się daleko więcej, niż rtęć tak, że przy oznaczaniu jego ciężaru właściwego musimy uwzględnić temperaturę w danych dwóch miejscach obserwacyi. Wreszcie para wodna, zawarta w powietrzu, wywiera również ciśnienie na rtęć w barometrze; wielkość tego ciśnienia powinna także być uwzględniona przy dokładnem określeniu wysokości barometrycznej.

§ 4. Pompy. Syfon.

Historya odkryć powiada nam, że jakkolwiek fakt ciśnienia powietrznego poznano i objaśniono nie dalej jak 200 lat temu, to zastosowanie praktyczne tego ciśnienia sięga epoki o wiele odleglejszej. Galileusz i Toricelli podali teoryę ciśnienia atmosferycznego, pompę zaś czyli studnię wynalazł o wiele dawniej Ktezybiusz, sławny matematyk i fizyk, który żył w Aleksandryi na 130 lat przed Nar. Chr., a więc około 100 lat po Archimedesie.

Obecnie przystępujemy do opisu rozmaitych pomp, przyczem szczególną będziemy zwracali uwagę na samą zasadę ich urządzenia.

Jeżeli zanurzymy w wodzie wydrążony walec, na dnie którego znajduje się otwór i w którym porusza się szczelnie przystający tłok, zobaczymy, że przy całkowitem zepchnięciu tego ostatniego aż na dno walca i następnem podniesieniu go do góry, woda wejdzie do walca (fig. 122, str. 161). Wiemy już, że dzieje się to wskutek próżni, powstającej pod tłokiem oraz wskutek ci-

KSIĘGARNIA NAKŁADOWA

H. OLAWSKIEGO

Mazowiecka Nr. 6,

POLECA:

HISTORYĘ NATURALNĄ

D-ra G. Hayeka,

zawierającą 72 tablic zoologicznych z 845 kolorowanemi figurami, 40 tablic botanicznych z 445 kolorowanemi figurami i 8 mineralogicznych z 75 figurami. — Cena kompletu Rs. **18**; w ozdobnej oprawie Rs. **22**.

Także do nabycia (tak długo jak zapas starczy)

w 30-tu zeszytach po kopiejek **60**.

Autorowi dzieła *przyznano* na wystawie w Tryeście w r. 1882 **złoty medal** w dziale sztuk i nauk.

HISTORYĘ POWSZECHNĄ

BECKERA,

w przekładzie dopełnionym i uzupełnionym

w epoce dziejów najnowszych,

pod redakcyą **M. Wołowskiego**, w 12 tomach po Rs. **1** kop. **10** za tom (oprawne tomy zawierające po 2 tomy po Rs. **2** kop. **50**) lub w zeszytach po kop. **10**.

GEOGRAFJĘ POPULARNĄ

czyli

Ziemia w malowniczych obrazach.

Opisy najciekawszych krajów, ludów i miejscowości według najnowszych źródeł i najcelniejszych autorów, opracował

Dr. Wł. Wicherkiewicz,

z mapkami i drzeworytami, w 53-ch zeszytach po kop **15**.

Podręczniki do nauki języków obcych

(Z WYMOWĄ)

podług metody **D-ra H. Loewego.**

JĘZYK FRANCUZKI	JĘZYK NIEMIECKI
	(pod prasą)
ze słownikiem	ze słownikiem
francuzko-polskim i polsko-francuzkim,	polsko-niemieckim i niemiecko-polskim,
komplet w 25 zeszytach	komplet w 25 zeszytach
po 15 kop.	po 15 kop.

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

CENA 20 KOP.

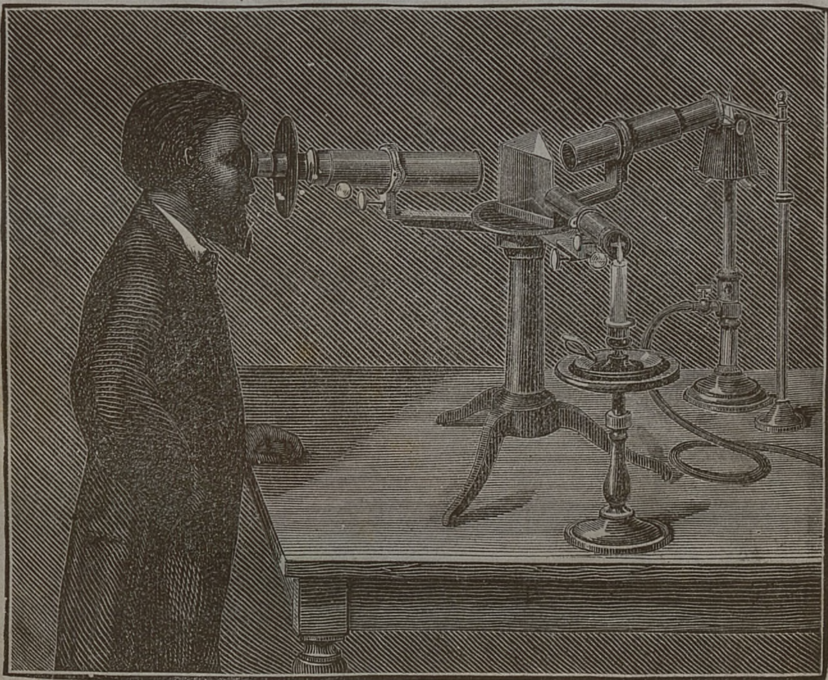
Zeszyt 6.

CENA 20 KOP.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

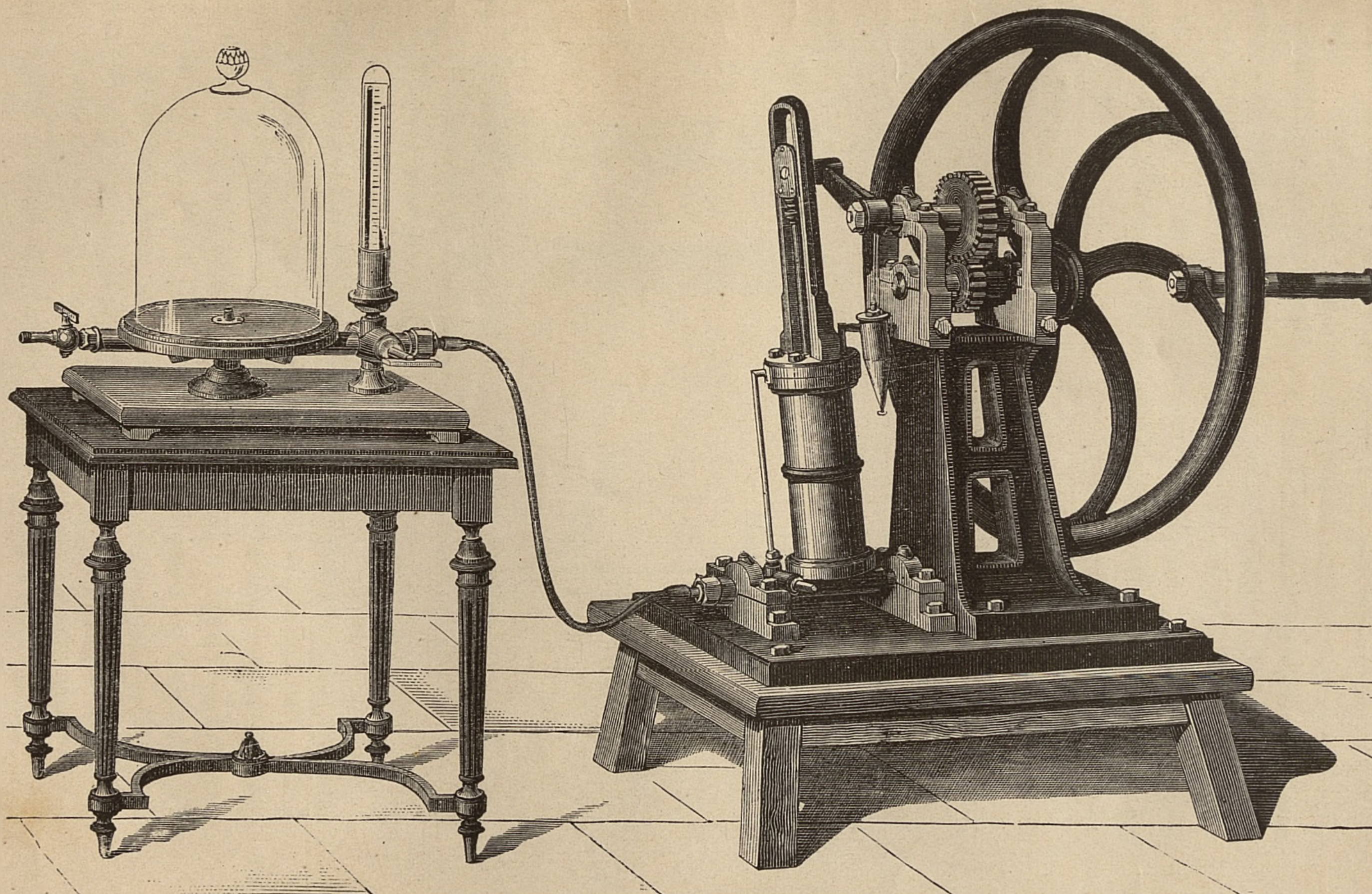
Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.



Tabl. VI. **Maszyna pneumatyczna Bianchi'ego.**

śnienia atmosferycznego, działającego na zewnętrzny poziom wody. Przypuśćmy, że wysokość walca wynosi więcej niż $10^1/_3$ metra i że jest podostatkiem wody w zewnętrznem naczyniu; ciecz podniesie się jednak tylko do wysokości $10^1/_3$ metra i zatrzyma na tym poziomie, pomimo iż będziemy dalej tłok podnosili do góry. Słup bowiem wody rzeczonej wysokości akurat równoważy ciśnienie atmosfery; dlatego też robotnicy florenccy

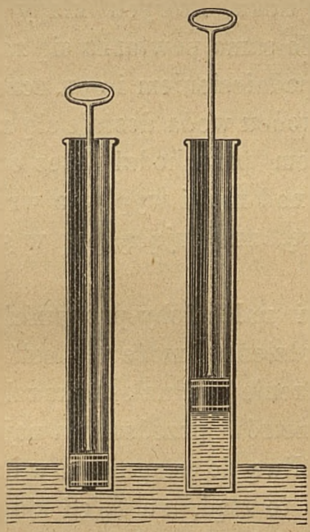


Fig. 122. Zasada pompy ssącej.

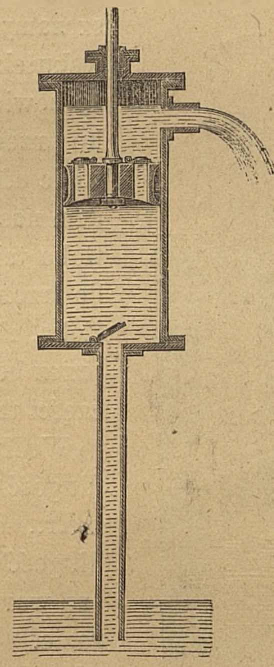


Fig. 123. Szemat pompy ssącej.

(patrz str. 144) nie mogli podnieść wody w studni na większą wysokość.

W sposób dopiero co opisany urządzone są zwykłe ręczne strzykawki; na tej samej także zasadzie polegają najbardziej używane pompy, które otrzymały nazwę *ssących* od tego, że podczas podnoszenia tłoka wsysają w siebie daną ciecz. Właściwy walec takiej pompy czyli trzon wydłuża się w węższą rurę, zwaną ssącą, którą zanurza się w wodzie (fig. 123); w miejscu, gdzie trzon i rura stykają się, znajduje się klapa, otwierająca się tylko

do góry; sam zaś tłok jest przedziurawiony w dwóch lub więcej miejscach, a każdy z otworów zaopatrzony jest w klapę, podnoszącą się również tylko do góry. Łatwo zrozumieć, co zachodzi przy kolejnem podnoszeniu i opuszczaniu tłoka: przy pierwszem podniesieniu, powietrze, znajdujące się pod tłokiem, rozszerza się i nie ciśnie tak silnie jak przedtem ([1]); dlatego też zewnętrzne ciśnienie atmosferyczne wpędza nieco wody do rury ssącej, przez co znów powietrze zostaje wciśnięte do trzonu pompy. Gdy spuszczamy tłok, ściskamy powietrze w trzonie, wskutek czego dolna klapa zamyka się tak, że powietrze to może wyjść na zewnątrz tylko przez otwory tłoka, których klapy samo sobie odmyka. To samo powtarza się za każdem następnem podniesieniem i opuszczeniem tłoka tak, że w końcu woda dostaje się z rury do trzonu, poczem przechodzi przez otwory tłoka, zbiera się nad nim i wypływa wreszcie przez boczną rurę, znajdującą się w górnej części trzonu.

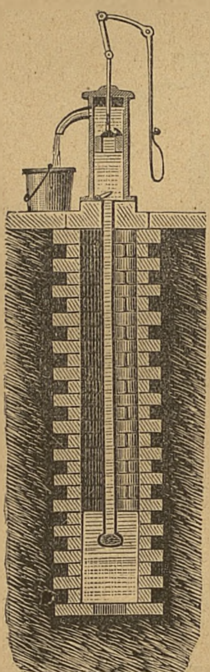


Fig. 124. Pompa ssąca.

Według teoryi należałoby przypuścić, że długość rury studziennej może wynosić $10\frac{1}{3}$ metr., doświadczenie jednak pokazało, że długość 7 do 8 metrów przedstawia największą wartość, możliwą do osiągnięcia w danym razie. Pochodzi to ztąd, że tłok i klapy nigdy nie przystają tak szczelnie, ażeby powietrze wcale do wnętrza pompy przedostać się nie mogło; oprócz tego, w wodzie znajdują się zawsze pęcherzyki powietrza, które zbierają się po nad nią i przeciwdziałają, jakkolwiek słabo, ciśnieniu atmosferycznemu. Dlatego też pompy ssące zakłada się tylko przy źródłach, nie leżących głębiej nad 7—8 metrów poniżej punktu, do którego należy podnosić wodę, inaczej bowiem ciśnienie powietrza nie wystarczyłoby do wpędzenia wody do pożądanej wysokości.

([1]) Patrz niżej Roz. X, § 1.

Figura 124 (str. 162) przedstawia pompę ssącą, założoną przy takiem niezbyt głębokiem źródle.

W *pompie tłoczącej* (fig. 125) walec, w którym porusza się tłok, jest tak głęboko zanurzony w wodzie, że ta ostatnia wchodzi doń pod wpływem zewnętrznego ciśnienia samej cieczy, podobnie jak to ma miejsce w naczyniach połączonych; walec nadto u dołu jest zamknięty przez klapę, otwierającą się tylko do góry. Tłok jest pełny i przy podnoszeniu go do góry, woda wchodzi do trzonu pompy, przy obniżaniu zaś zostaje wciśnięta do bocznej rurki, przez którą wypływa na zewnątrz. Nakoniec w pompie *ssąco-tłoczącej* (fig. 126), łączącej w sobie obadwa systemy, woda zostaje wessana przez rurę ssącą i wprowadzona do trzonu pompy, zkąd znów tłok wtłacza ją do bocznej rurki. Pompy ssąco-tłoczące zakładane są przy głębokich źródłach, z których woda zostaje najprzód wessaną przez pompę ssącą do pewnej wysokości, zkąd dopiero za pomocą przyrządu tłoczącego wydostaje się ją na zewnątrz. Opisane pompy dają strumień przerywany, woda bowiem wypływa przez nie tylko przy spychaniu (fig. 126), albo tylko przy podnoszeniu (fig. 123) tłoka. W celu uniknięcia tej niewygody, zbudowano pompy podwójnie i jednocześnie działające, to jest takie, które zarówno przy podnoszeniu, jak

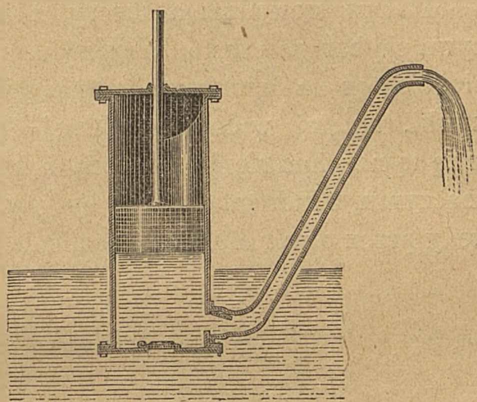


Fig. 125. Szemat pompy tłoczącej.

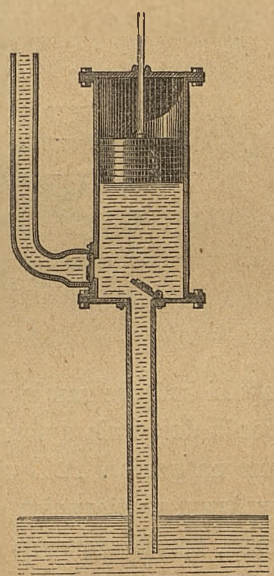


Fig. 126. Szemat pompy ssąco-tłoczącej.

i opuszczaniu tłoka, wsysają z jednej strony wodę, z drugiej zaś wtłaczają ją do trzonu.

Do przeprowadzania cieczy z jednego naczynia w drugie używa się bardzo często przyrządu, zwanego *syfonem*, również polegającego na działaniu ciśnienia powietrza. Syfon składa się z rurki, zgiętej w dwa nierównej długości ramiona (fig. 127); rurkę tę napełnia się daną cieczą i zanurza krótszem ramieniem w naczyniu, z którego ciecz ma być wylaną. Ta ostatnia wypływa wtedy przez otwór dłuższego ramienia, a ruch ten trwa tak długo,

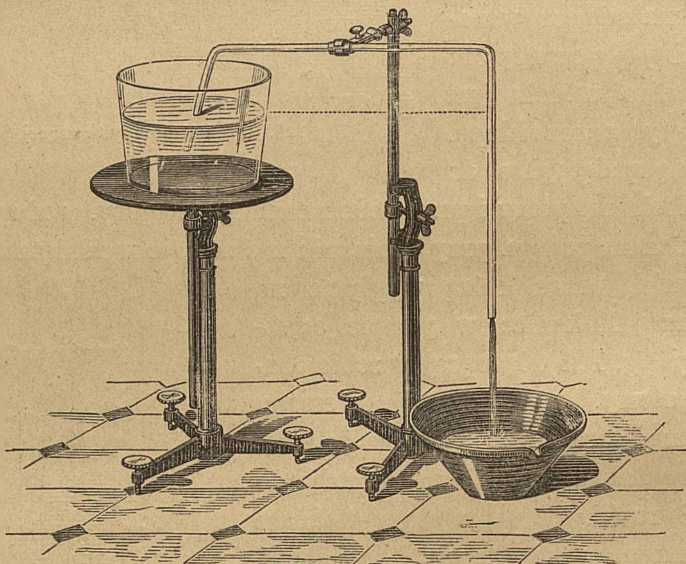


Fig. 127. Syfon.

dopóki krótsze ramię zanurzone jest w cieczy. Ażeby zrozumieć sposób działania syfonu, należy zauważyć, że ciśnienie, wywierane na poziom *A B* cieczy (fig. 128, str. 165) i zmuszające ją do wypływu w kierunku od *C* do *F*, równa się ciśnieniu atmosferycznemu, zmniejszonemu o ciężar słupa wody od tegoż poziomu do górnej ścianki rurki. Ciśnienie zaś, wywierane na ciecz w *F*, pchające ją w kierunku przeciwnym—od *F* do *C*, równa się ciśnieniu atmosferycznemu, mniej ciężar słupa wody od poziomu w *F* do górnej ścianki rurki. Otóż ten ostatni słup jest większy od po-

przedniego o długość *I K*, z czego wynika, że ciśnienie, działające w *F* jest mniejsze od ciśnienia w *A B;* ciecz też płynie w kierunku większego ciśnienia. Szybkość przepływu jest tem większa, im większa jest różnica wysokości poziomów przy otworze dłuższego ramienia syfonu i w naczyniu *A B*. Ponieważ ciśnienie powietrza, wywierane na poziom *A B*, wciska ciągle ciecz do rurki, wypływ z niej jest ciągły, lecz w miarę ubywania cieczy z naczynia, coraz to wolniejszy.

Zależnie od natury cieczy, mającej być przelaną, nadaje się syfonom rozmaite kształty oraz używa rozmaitych sposobów ich napełniania; jeżeli dane ciecze nie są dla nas szkodliwe lub nieprzyjemne, można koniec dłuższego ramienia rurki wziąć w usta, koniec zaś krótszego zanurzyć w naczyniu i napełnić syfon, wsysając ciecz ustami.

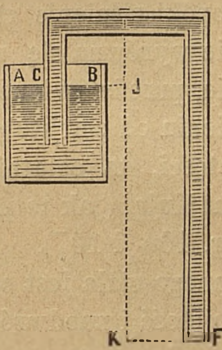


Fig. 128. Zasada syfonu.

Jamistości w ziemi zdają się niekiedy przyjmować kształt syfonów, co pozwala objaśnić niektóre zadziwiające zmiany stanu wód w jeziorach. Tak naprzykład w górach Karstu, w blizkości miasta Zyrknitz, leży jezioro, które od czasu do czasu dość szybko wysycha i następnie znów zostaje zasilone przez podziemne źródła. Przypuszczają, że dno tego jeziora jest połączone z rurowatemi jamistościami, wstępującemi najprzód do góry, a następnie znów obniżającemi się; jamistości te z kolei dochodzą do jakiegoś stałego zbiornika wody, z którego ta ostatnia przelewa się przez nie do jeziora tak długo, dopóki poziom w niem nie znajdzie się na tej samej wysokości, co najwyższy punkt rury podziemnej.

ROZDZIAŁ X.

Ściśliwość i rozprężliwość gazów.

§ 1. Prawo Boyle'a — Mariotte'a. Manometry.

Charakterystyczną cechą gazów, odróżniającą je od cieczy, jest ich dążność do zajmowania każdej wolnej przestrzeni, którą to własność nazywamy *rozprężliwością* gazów. Wskutek tej własności, której istotną naturę poznamy dopiero w końcu księgi o cieple, gazy wywierają ze wszech stron ciśnienie na ściany, ograniczające naczynie, w którem są zawarte, a gdy ściany te są ruchome, wtedy rozsuwają się one albo zbliżają tak długo, dopóki ciśnienie czyli *prężność* gazu, zamkniętego w naczyniu, nie wyrówna się z ciśnieniem zewnętrznem (patrz doświadczenie, przedstawione na fig. 106, str. 142). Gazy więc, w odróżnieniu od ciał stałych i ciekłych, nie posiadają samodzielnej objętości, ta ostatnia bowiem zależy od ciśnienia, pod jakiem się znajdują (jak to pokazują już doświadczenia, przedstawione na fig. 106 i 107). A że gęstość jednej i tej samej ilości wagowej danego ciała jest oczywiście tem większa, im mniejsza jest jego objętość i naodwrót, ta ostatnia zaś u gazów zależną jest od ciśnienia, przeto i gęstość danej masy gazu zmienia się wraz z ciśnieniem. Zachodzi teraz pytanie, jaką jest ta zależność objętości i gęstości gazu od ciśnienia, pod jakiem on się znajduje, innemi słowy, według jakiego prawa zmieniają się te trzy zależne od siebie wielkości. Odnośne prawo odkryte zostało prawie jednocześnie przez uczonego angielskiego Boyle'a w r. 1662 i przez fizyka francuzkiego Mariotte'a w r. 1679. Możemy je sformułować jak następuje: *Objętość gazu, przy stałej temperaturze, jest odwrotnie proporcyonalna do wywieranego nań ciśnienia, gęstość zaś jego—wprost proporcyonalna do tegoż ciśnienia.* Druga część tego prawa wprost wynika z pierwszej: jeżeli bowiem wskutek zdwojonego naprzykł. ciśnienia, objętość danej masy gazu zmniejszyła się 2 razy, wtedy w każdej jednostce jego objętości mamy 2 razy więcej masy, niż poprzednio, gaz więc ten jest teraz dwa razy gęściejszy.

Opiszemy tu doświadczenia Mariotte'a, które doprowadziły go do odkrycia rzeczonego prawa. Bardzo długą rurę szklaną zgiął on w dwa ramiona, z których jedno krótsze u góry zalutował, drugie zaś zostawił otwarte; wzdłuż obu ramion rury, przytwierdzonej do deski drewnianej, znajdowała się skala, dozwalająca odczytywać z jednej strony objętość zamkniętego w krótszem ramieniu powietrza, z drugiej zaś—wysokość słupa rtęci, służącego za miarę ciśnienia, pod jakiem znajdował się zamknięty gaz (fig. 129). Do rurki tej wlał z początku tyle rtęci, aby w obu ramionach sięgała do 0 skali, przez co zamknął w krótkiem ramieniu określoną objętość powietrza, w wypadku przedstawionym na figurze—25 centym. sześcien., pod ciśnieniem jednej atmosfery; zewnętrzne bowiem powietrze ciśnie na powierzchnię rtęci w otwartem ramieniu i, według prawa Pascala, przenosi się przez całą masę rtęci na powietrze, zawarte w krótszem ramieniu. Gdy następnie dolewał rtęci, poziom jej w obu ramionach się podnosił, lecz w krótszem ramieniu o wiele mniej, niż w długiem tak, że gdy w pierwszem doszła do $12\frac{1}{2}$ podziałki, a więc gdy zamknięte powietrze zajmowało tylko połowę pierwotnej objętości, poziom rtęci w długiem ramieniu stał o 76 cent., czyli o 760 milim. wyżej, niż w krótkiem. Wtedy jednak zamknięty gaz doznaje ciśnienia 2 atmosfer, oprócz bowiem ciśnienia zewnętrznego powietrza, podlega ono jeszcze ciśnieniu słupa rtęci na 760 milim. wysokiego, równającego się, jak już wiemy, ciśnieniu 1 atmosfery. Przy dalszem dolewaniu rtęci dopóty, dopóki różnica poziomów tej cieczy w obu ramionach nie stawała się równą 2, 3, 4 i t. d. razy wziętej wysokości barometrycznej, objętość zamkniętego w krót-

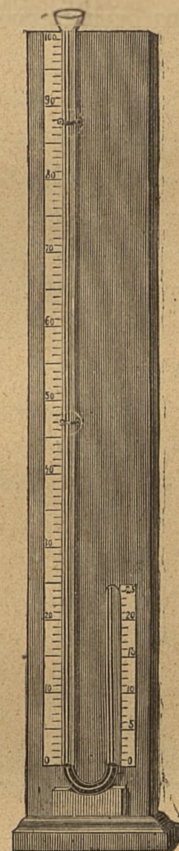


Fig. 129. Rurka do doświadczeń nad prawem Boyle'a—Mariotte'a dla ciśnień, większych od 1 atmosfery.

kiem ramieniu powietrza zmniejszała się do $^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_5$ i t. d. pierwotnej objętości.

W celu sprawdzenia prawa Boyle'a—Mariotte'a dla ciśnień, mniejszych od jednej atmosfery, możemy użyć metody, jaką w zasadzie posługiwał się już sam Mariotte. Możliwie walcowatą rurkę barometryczną, zaopatrzoną w podziałki, napełniamy całkowicie rtęcią, jak to się czyni przy sporządzaniu barometru, zamykamy otwór palcem i, odwróciwszy ją zamkniętym końcem do góry, zanurzamy drugi koniec w rtęci, znajdującej się w długiem naczyniu *PM* ze szkła—albo lepiej jeszcze z lanego żelaza—tak, jak to pokazuje fig. 130. Do utworzonej próżni barometrycznej wprowadzamy za pomocą odpowiedniej rurki nieco suchego powietrza, przyczem rtęć w rurce natychmiast opada; spychamy wtedy rurkę w żelazne naczynie dopóty, dopóki rtęć w rurce i w naczyniu nie stanie na tym samym poziomie (patrz lewą stronę figury). Podziałka, przy której staje wtedy rtęć w rurce, pokazuje nam objętość zamkniętego w niej powietrza *A B*, znajdującego się pod ciśnieniem 1 atmosfery. Następnie wyciągamy rurkę,—tak jednak, aby koniec jej znajdował się jeszcze pod rtęcią,—wtedy objętość zamkniętego w niej powietrza się zwiększa, jednocześnie jednak rtęć podnosi się i staje wyżej niż w naczyniu. Różnica pomiędzy wysokością barometryczną a wysokością podniesionego w rurce słupa rtęci pokazuje nam ciśnienie, wywierane na zamknięty gaz: Na zewnątrz bowiem rurki rtęć doznaje ciśnienia atmosfery, równającego się ciśnieniu słupa rtęci

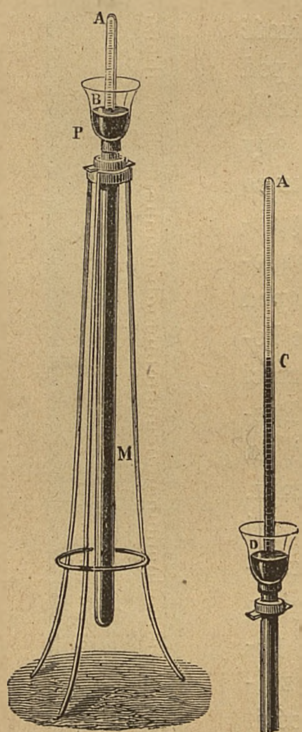


Fig. 130. Doświadczalny dowód prawa Boyle'a—Mariotte'a dla ciśnień mniejszych od 1 atmosfery.

o wysokości barometrycznej, które wewnątrz rurki zostaje częściowo zrównoważone przez ciśnienie podniesionego słupa rtęci; nadmiar przeto wysokości barometrycznej nad wysokością podniesionego w rurce słupa rtęci pokazuje ciśnienie, wywierane na zamknięty gaz; ten ostatni z drugiej strony, wywiera, wskutek swej rozprężliwości, takie same ciśnienie na ściany i na rtęć. Wyciągnąwszy rurkę tak wysoko, aby powietrze zajęło dwa razy większą objętość *A C*, niż w początku doświadczenia (t. j. wtedy, gdy rtęć w naczyniu i w rurce stoi na jednakowym poziomie), przekonamy się, że rtęć podnosi się w rurce na długość *D C*, o 380 milimetr. ([1]) wyżej, niż w naczyniu, a więc powietrze w rurce doznaje ciśnienia $^1/_2$ atmosfery (760—380). Tak samo przy powiększaniu objętości powietrza 3, 4, 5 i t. d. razy, zmniejszamy tyleż razy wywierane na nie ciśnienie oraz ciśnienie samego zamkniętego gazu, przez co powyższe prawo zostaje dowiedzione i w wypadku ciśnień mniejszych, niż 1 atmosfera.

Na objętość gazu, oprócz ciśnienia, wywiera jeszcze znaczny wpływ temperatura tak, że prawo Boyle'a—Mariotte'a, wyrażające jedynie związek pomiędzy objętością gazu a jego ciśnieniem, jeżeli w ogóle jest słuszne, to tylko przy niezmiennej temperaturze. Otóż przy powyższej metodzie eksperymentowania, bardzo trudno jest utrzymać badany gaz przy stałej temperaturze, czego Mariotte wcale nie uwzględnił tak, że opisane doświadczenia nie są dostatecznie dokładne. Oprócz tego, posługując się rzeczoną metodą, można tylko w ciasnych granicach zmieniać ciśnienie, wywierane na gaz. W obec wielkiej doniosłości omawianego tu prawa, ważną atoli jest rzeczą wiedzieć, czy jest ono słuszne dla wszystkich gazów i dla wszelkich ciśnień, a dalej czy jest ono ściśle, czy też tylko przybliżenie dokładne. Od czasów też Boyle'a i Mariotte'a kwestyą tą zajmowało się wielu fizyków, jak Oersted i Swendsen, Despretz, Arago i Dulong, Pouillet, Régnault, Natterer, Cailletet i inni; zwłaszcza zaś Régnault'owi, który posługiwał się ulepszoną metodą Mariotte'a

([1]) Dla uproszczenia sobie zadania, przyjmujemy, że w czasie doświadczeń wysokość barometryczna wynosi 760 milimetrów.

i ściśle uwzględnił warunek, aby temperatura badanego gazu podczas doświadczenia się nie zmieniała, zawdzięczamy najrozleglejsze doświadczenia w tej mierze. Dla braku miejsca nie możemy się tu wdawać w szczegóły tych badań, dotyczących zachowania się powietrza oraz innych gazów, ograniczymy się więc tylko na podaniu ogólnych rezultatów.

Pod omawianym tu względem gazy można podzielić na dwie grupy: do pierwszej należą takie, które bardzo trudno dają się skroplić, jak powietrze, tlen, azot, wodór, tlenek węgla i niektóre inne; do drugiej zaś zaliczamy gazy, łatwo dające się skroplić, jak kwas węglany, amoniak, siarkowodór, dwutlenek siarki i t. d. Gazy, należące do pierwszej grupy, poddane ciśnieniu, nie przekraczającemu kilku atmosfer, tak mało zbaczają od prawa Boyle'a—Mariotte'a, że, bez popełnienia znacznego błędu, możemy prawo to dla rzeczonych gazów uważać jako ściśle dokładne. Jednakowoż wypada nadmienić, że podczas gdy, przy ciśnieniach aż do 30 atmosfer, powietrze, tlen, azot i tlenek węgla są nieco więcej ściśliwe, niż tego wymaga prawo—t. j. że naprzykład objętość ich zmniejsza się nieco więcej niż 2 razy, jeżeli podwajamy wywierane na nie ciśnienie,—jeden gaz—wodór, przeciwnie, jest nieco mniej ściśliwy. Rzecz się zmienia przy bardzo znacznych ciśnieniach, wtedy mianowicie, jak to wykazał Natterer, wszystkie gazy, należące do 1 grupy, zachowują się podobnie jak wodór: przy wzrastającem ciśnieniu, zostają one o wiele mniej ściśnione, niż tego wymaga prawo Boyle'a—Mariotte'a. Zupełnie inaczej zachowują się gazy, które zaliczyliśmy do 2 grupy: wszystkie one, nawet przy ciśnieniu kilku atmosfer, zostają silniej ściśnione, niż wypada z owego prawa. Dalej wykazano dla kwasu węglanego i kilku innych gazów, że zboczenia ich od prawa Boyle'a—Mariotte'a stają się tem mniejsze, im wyższą jest ich temperatura, a względy teoretycznej natury każą przypuszczać, że każdy gaz przy pewnej dostatecznie wysokiej temperaturze ściśle stosowałby się do tego prawa.

Zobaczymy w księdze o cieple, że wszystkie gazy dają się przeprowadzić w stan ciekły, innemi słowy że mogą być skroplone przez mniej lub więcej znaczne obniżenie temperatury

i zwiększenie ciśnienia; przeciwnie, im wyższa jest ich temperatura i im mniejsze wywierane na nie ciśnienie, a więc także im bardziej są rozrzedzone, tem bardziej oddalają się one od punktu swego skroplenia. Możemy więc, jak to wyraźnie pierwszy uczynił Régnault, ogólny wynik doświadczalny rozważanych tu badań sformułować w ten sposób, że *każdy gaz tem ściślej się stosuje do prawa Boyle'a—Mariotte'a, im więcej jest oddalony od punktu swego skroplenia*, t. j. im wyższa jest jego temperatura i im większy jest stan jego rozrzedzenia.

Dalton pierwszy wykazał prawo, że *ciśnienie, wywierane przez mięszaninę kilku gazów, równa się sumie ciśnień pojedyńczych jej części składowych.* Jeżeli naprzykład mamy mięszaninę z 1 części tlenu i 4 azotu pod ciśnieniem 1 atmosfery, to cząstkowe (parcyalne) ([1]) ciśnienie pierwszego gazu wynosi $^1/_5$, drugiego zaś—$^4/_5$ jednej atmosfery. Według tego więc prawa, każdy gaz wywiera takie same ciśnienie, niezależnie od tego, czy wprowadzamy go do przestrzeni, w której znajduje się już inny gaz, czy do próżni. Ciśnienie zewnętrznej atmosfery składa się tedy z oddzielnych ciśnień cząstkowych azotu, tlenu, pary wodnej, kwasu węglanego i t. d., i mówiąc o ciśnieniu, dajmy na to, tlenu atmosferycznego, mamy na myśli tę część ogólnego ciśnienia atmosfery, która przypada na ten gaz.

Przyrządy, służące do oznaczania prężności gazów i par, zowią się *manometrami*. We wszystkich tych przyrządach za jednostkę miary przyjęto jednę atmosferę, czyli ciśnienie powietrza, gdy barometr pokazuje 760 milimetrów, a wiemy, że ono równa się ciśnieniu, wywieranemu przez ciężar $1^{\text{kilogr.}},33$ na każdy centymetr kwadratowy. Jeżeli gaz jest w stanie utrzymać w równowadze słup rtęci, wysoki na 1, 2, 3 razy 760 milimetrów, powiadamy, iż prężność tego gazu jest równa ciśnieniu 1, 2, 3 atmosfer.

Manometr otwarty (fig. 131, str. 172) składa się z wysokiej rurki, której górny koniec swobodnie komunikuje z atmosferą, dolny zaś jest połączony z szerszym zbiornikiem *A;* z kolei ten

---

([1]) Od łacińskiego wyrazu pars—część.

ostatni, za pomocą rurki *C* łączymy z naczyniem, zawierającem dany gaz lub parę, których prężność mamy oznaczyć. Zbiornik *A* jest napełniony rtęcią i wraz z rurką manometryczną przymocowany do długiej deseczki, zawieszonej pionowo. W celu nakreślenia podziałek na manometrze, wystawia się rtęć w zbiorniku na działanie atmosfery i w miejscu, gdzie zatrzymuje się rtęć w rurce wysokiej, stawia znak 1, wskazujący ciśnienie jednej atmosfery. Począwszy od tego punktu co każde 76 centymetrów, kreśli się na rurce cyfrę 2, 3, 4 i t. d., odpowiadającą ciśnieniu 2, 3, 4 . . . atmosfer; odległość pomiędzy dwoma następującemi po sobie znakami dzieli się na 10 części, co pozwala oznaczać ciśnienie w dziesiątych częściach atmosfery. Cyfry, nakreślone po lewej stronie rurki, dają nam wysokość słupa rtęci w centymetrach. Chcąc naprzykład wiedzieć, jaka jest prężność pary w kotle parowym, łączy się z nim rurkę *C* manometru i wtedy podziałka, przed którą zatrzymuje się poziom rtęci w rurce *B D*, wskazuje bezpośrednio szukaną prężność. Na rysunku manometr pokazuje ciśnienie 2 atmosfer, odpowiadających ciśnieniu słupa rtęci, wysokiego na 76 centymetrów oraz ciśnieniu atmosfery, działającej przez otwarty koniec *D* rurki na zawartą w niej rtęć. Opisany tutaj manometr używa się zwykle tylko do mierzenia ciśnień, nie przechodzących 5 do 6 atmosfer; przy jeszcze wyższem ciśnieniu należałoby rurkom manometrycznym nadawać zbyt wielką długość, co znacznie utrudniałoby obchodzenie się z niemi. Pomimo jednak wielkich trudności, wynikających z tego powodu, uczeni Dulong i Arago oraz Régnault, przy badaniach nad ściśliwością gazów, używali manometrów otwartych do oznaczania prężności, dochodzącej do 27 atmosfer. Cailletet zaś mierzył

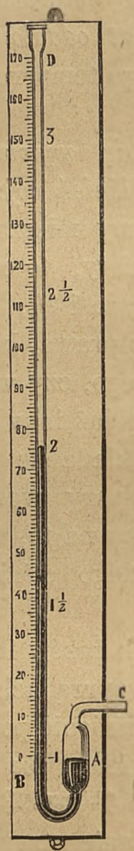


Fig. 131. Manometr otwarty.

jeszcze większe ciśnienie za pomocą podobnego manometru, utworzonego przez stalową rurkę, mającą 3 milimetry w średnicy i 250 metrów długości; rurka ta była nawinięta wzdłuż spiralnego wyżłobienia, wyciętego na powierzchni drewnianego walca, który mógł być obracany około swej osi. Zależnie od kierunku obrotu, rurka manometryczna odwijała się lub nawijała na walec, co znakomicie ułatwiało obchodzenie się z przyrządem.

W manometrze wyżej opisanym, prężność gazu mierzy się wysokością równoważonego słupa cieczy. W *manometrze zamkniętym* prężność mierzy się zmniejszeniem objętości, jakiemu ulega określona ilość powietrza; przyrząd ten stanowi więc bezpośrednie zastosowanie prawa Boyle'a — Mariotte'a. Rurka manometryczna, nie mająca więcej nad 60 do 80 centymetrów długości, zamknięta u góry i napełniona powietrzem, dolnym otwartym końcem zanurzona jest w naczyniu z rtęcią (fig. 132). Naczynie to zrobione z żelaza, z powodu wielkiego ciśnienia, jakiemu może ewentualnie

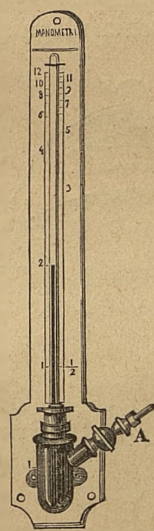


Fig. 132. Manometr zamknięty.

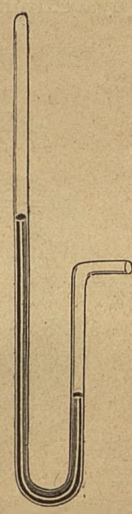


Fig. 133. Szemat manometru zamkniętego.

uledz, posiada w górnej swej części otwór, służący właśnie do przepuszczenia rurki, mocno i szczelnie w tem miejscu przylutowanej. Z boku naczynia znajduje się jeszcze rurka *A*, łącząca manometr ze zbiornikiem, zawierającym gaz, którego prężność mamy oznaczyć. Figura 133 przedstawia szemat manometru zamkniętego. Podziałki na tym przyrządzie oznacza się empirycznie w sposób następujący: wprowadza się doń tyle powietrza, ażeby poziom rtęci w rurce i w naczyniu był jednakowy, co następuje przy ciśnieniu 1 atmosfery, następnie łączy przyrząd ze zbiornikiem, w którym powietrze ulega ściskaniu za pomocą pompy

zgęszczającej. Oprócz tego, z tymże zbiornikiem komunikuje także manometr otwarty, już oznaczony podziałkami. W miarę ściskania powietrza rtęć jednocześnie podnosi się w obu przyrządach; gdy jeden z nich wskazuje 1, 2, 3 . . . atmosfer, pisze się te same cyfry na wysokości poziomów rtęci w manometrze nieoznaczonym, mianowicie na skali, idącej wzdłuż rurki.

W *manometrze metalowym* Bourdon'a, bardzo często używanym przy maszynach parowych, niema wcale rtęci. Polega on, podobnie jak barometr-aneroid, na zmianie kształtu, jakiej pod wpływem ciśnienia ulega skręcona rurka o ściankach giętkich, cienkich i lekko spłaszczonych: ciśnienie wewnętrzne rozkręca ją, ciśnienie zaś zewnętrzne skręca ją jeszcze bardziej. Przyrząd składa się z takiej rurki mosiężnej, długiej na 0metr.,70 i skręconej spiralnie w jeden i pół obrotu (fig. 134). Poprzeczny jej przekrój przedstawia elipsę, której wielka oś równa się 11 milimetrom, mała zaś—4 milim. Otwarty koniec *a* jest połączony, za pośrednictwem rurki, dającej się zamykać kranem *m*, z kotłem parowym; przeciwny zaś koniec *b* jest zalutowany i zaopatrzony w długą strzałkę *e*. Jeżeli otworzymy kran *m*, ciśnienie pary z kotła, wywierane na wewnętrzne ścianki rurki, rozkręca ją, przez co koniec jej *b* wraz ze strzałką przesuwa się z lewa na prawo po cyferblacie. Podziałki tego ostatniego, oznaczające ciśnienie 1, 2, 3, 4 . . . atmosfer, kreśli się przez porównanie z manometrem otwartym ([1]).

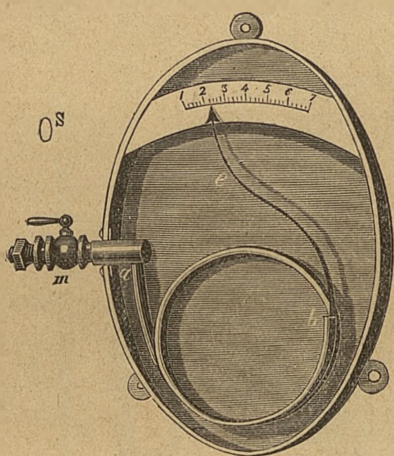


Fig. 134. Manometr Bourdon'a.

([1]) A. Ganot. Traité de Physique.

§ 2. Rozprężliwość gazów.—Pompy powietrzne czyli maszyny pneumatyczne.

Na zasadniczej własności gazów—ich rozprężliwości, odróżniającej je od cieczy, polega jeden z najważniejszych przyrządów fizycznych—*pompa powietrzna* czyli *maszyna pneumatyczna*, za pomocą której możemy wydalić powietrze, lub jakikolwiek inny gaz, z danej przestrzeni. Wynalazek tej maszyny zawdzięczamy wspomnianemu już kilkakrotnie burmistrzowi magdeburskiemu Otonowi von Guericke, który za jej pomocą pierwszy wykonał ciekawe doświadczenia, opisane już przez nas w rozdziale o ciśnieniu gazów; do udoskonalenia zaś tego przyrządu przyczynili się różni fizycy.

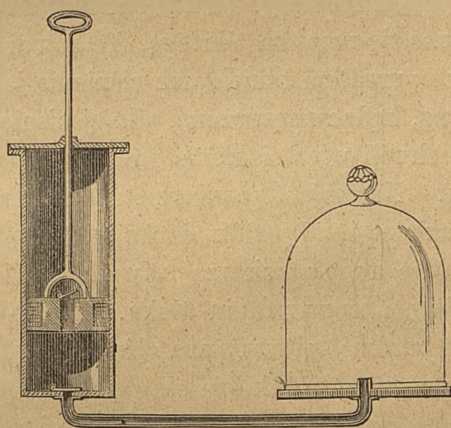


Fig. 135. Sposób działania tłoka i klap w maszynie pneumatycznej.

Najprostsza maszyna pneumatyczna (fig. 135) składa się z walcowatej rury czyli trzonu, ze spodu którego wychodzi wązki kanał, kończący się pośrodku doskonale wypolerowanego talerza, służącego do umieszczania klosza szklanego lub w ogóle naczyń, z których chcemy wypompować powietrze. Składowe części przyrządu mogą być oddzielone lub połączone ze sobą, jako też z zewnętrznem powietrzem, za pomocą odpowiednio urządzonych klap. Dla prostoty wykładu przypuśćmy, że tylko kanał łączący trzon z kloszem oraz otwór w tłoku, są zaopatrzone w klapy, otwierające się tylko do góry tak, jak pokazuje figura 135.

Wyobraźmy sobie, że w chwili, gdy tłok zajmuje najniższe położenie, t. j. gdy dotyka dna trzonu, umieszczamy na talerzu pompy klosz, który zawiera wtedy powietrze o zwykłem ciśnie-

niu atmosferycznem. Jeżeli teraz podniesiemy tlok do góry, powstanie pod nim próżnia tak, że powietrze, zawarte w kloszu, nie znajdując oporu przy rozszerzaniu się, otworzy klapę kanału i wejdzie do trzonu; ponieważ zajmuje ono obecnie większą niż przedtem objętość, jest więc rozrzedzone. Dajmy na to, że objętość trzonu od podstawy do dolnej powierzchni tłoka, w chwili, gdy ten ostatni zajmuje najwyższe położenie, równa się objętości klosza oraz kanału łączącego; wtedy, podług prawa Boyle'a—Mariotte'a, po pierwszem całkowitem podniesieniu tloka, ciśnienie powietrza pod kloszem i w pompie zostaje zredukowane do połowy pierwotnego ciśnienia, a więc w danym wypadku do ciśnienia $^1/_2$ atmosfery. Przy opuszczaniu tłoka, dolna klapa natychmiast się zamyka dlatego, że zawarte w trzonie powietrze, mające przedtem takie same ciśnienie jak powietrze z pod klosza,— teraz, będąc zgęszczane, silniej ciśnie na klapę z góry na dół; od tej chwili więc ciśnienie powietrza pod kloszem już się nie zmienia. Natomiast powietrze, zawarte w trzonie, coraz silniej jest ściskane i gdy tłok dochodzi do połowy wysokości trzonu, ciśnienie tego powietrza równa się 1 atmosferze. Przy jeszcze dalszem opuszczaniu tłoka, ciśnienie powietrza w trzonie coraz bardziej przewyższa ciśnienie zewnętrznej atmosfery, wskutek czego górna klapa się otwiera i powietrze z pod tłoka wychodzi na zewnątrz tak długo, dopóki tenże nie dosięgnie dna trzonu. Przez powtarzanie takiego ruchu, przy podanej objętości klosza i trzonu, ciśnienie powietrza przy drugiem całkowitem podniesieniu tłoka zostaje zredukowane do $^1/_4$, przy trzeciem—do $^1/_8$, przy czwartem—do $^1/_{16}$ atmosfery i t. d.

To, cośmy powiedzieli o zmniejszaniu ciśnienia powietrza pod kloszem, stosuje się, według prawa Boyle'a—Mariotte'a, także w równej mierze do jego gęstości tak, że po czwartem, naprzykład, całkowitem podniesieniu tłoka, gęstość ta zredukowana zostanie do $^1/_{16}$ pierwotnej gęstości.

Jeżeli stosunek objętości klosza i trzonu jest inny, inny także jest, rozumie się, stosunek, według którego odbywa się zmniejszanie ciśnienia i gęstości powietrza pod kloszem, przy oddzielnych poruszeniach tłoka.

Przy powyższem jednak urządzeniu maszyny pneumatycznej, rozrzedzenie powietrza pod kloszem wkrótce dosięgłoby maksymalnej granicy, powietrze bowiem dopóty tylko przechodzi z klosza do trzonu, dopóki jeszcze może podnosić dolną klapę. Gdy więc po kilku poruszeniach tłoka, ciśnienie powietrza pod kloszem na tyle się zmniejszy, że nie będzie już w stanie podnieść klapy, wtedy przestanie przechodzić do trzonu i dalsze podnoszenie tłoka będzie bezskuteczne.

Dla usunięcia tej niedogodności, ulepszono maszynę pneumatyczną w ten sposób, że sam tłok przy podnoszeniu otwiera kanał, łączący trzon z kloszem, przy opuszczaniu zaś zamyka takowy. Fig. 136 przedstawia urządzenie tłoka w takiej udoskonalonej pompie: tłok jest przedziurawiony, otwór zaś zamknięty przez małą blaszkę *a*, którą przyciska niezbyt mocna sprężyna tak, że nawet słabe ciśnienie, wywierane od dołu, odmyka blaszkę. Kanał, łączący trzon z kloszem, jest zamknięty przez stożek *b*, przytwierdzony do pręta *T*, nieco niższego od samego trzonu i ze znacznem tarciem przesuwającego się wzdłuż wnętrza tłoka *C C*. Przy podnoszeniu tłoka, stożek wychodzi z otworu i komunikacya między trzonem i kloszem zostaje przywrócona; lecz stożek od otworu zbytnio oddalić się nie może, albowiem pręt, wskutek przymocowanego doń poprzecznego pręcika, wkrótce zostaje zatrzymany przez pokrywkę trzonu; przy opuszczaniu tłoka, otwór kanału łączącego natychmiast zostaje zamknięty przez stożek *b* pręta *T*. Urządzenie takie przedstawia tę korzyść, że przez same poruszenia tłoka naprzemian przywraca się i przerywa komunikacya między kloszem i trzonem tak, że powietrze może bez przeszkody przechodzić z pierwszego do drugiego.

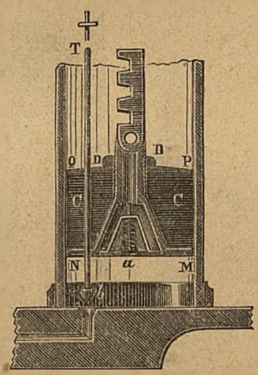


Fig. 136. Urządzenie tłoka w udoskonalonej maszynie pneumatycznej.

W opisanej pompie jednotrzonowej, powietrze, znajdujące się pod kloszem, zostaje rozrzedzone tylko przy podnoszeniu tłoka,

przy opuszczaniu bowiem tego ostatniego wydalamy jedynie powietrze z trzonu, nie zaś z klosza, połowa więc wszystkich poruszeń tłoka dla właściwego celu maszyny jest stracona. Oprócz tego, pompa taka przedstawia jeszcze jednę ważną niedogodność: gdy mianowicie powietrze zostało już prawie zupełnie wypompowane, wtedy przy podnoszeniu tłoka należy przezwyciężać nietylko tarcie jego o ścianki trzonu, lecz nadto ciśnienie zewnętrznego powietrza, uciskającego tłok z góry na dół, a nie równoważonego już wtedy przez ciśnienie w kierunku przeciwnym. Ciśnienie rzeczone, wynoszące dla tłoka, którego poprzeczny przekrój równa się 1 decymetrowi kw., przeszło 100 kilogr., z początku nie daje się uczuć dlatego, że jest równoważone przez ciśnienie powietrza, znajdującego się pod tłokiem; w miarę jednak coraz większego rozrzedzania tego powietrza, podnoszenie tłoka staje się coraz trudniejsze, a przy tłokach większych rozmiarów i wyciąganych ręką— prawie niemożebne. Dla usunięcia obu tych braków, zbudowano maszyny dwutrzonowe, w których dwie obok siebie stojące pompy rozrzedzające połączone są za pomocą wspólnego kanału z kloszem. Tłoki *C C* obu pionowo stojących trzonów są przytwierdzone do zazębionych drągów (fig. 137), których zęby wchodzą pomiędzy zęby jednego i tego samego koła *P;* przy obracaniu koła za pomocą korby, jeden z tłoków podnosi się, drugi zaś opuszcza. Korzyści z takiego urządzenia są następujące: po

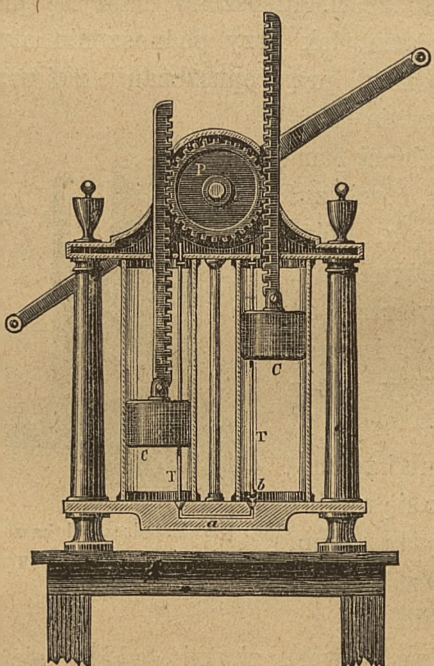


Fig. 137. Pionowy przekrój dwutrzonowej maszyny pneumatycznej.

pierwsze, żadne poruszenie korby nie jest stracone, podczas bowiem gdy opuszczający się tłok wydala powietrze z odnośnego trzonu, jednocześnie drugi podnoszący się tłok wypompowuje powietrze z klosza. Powtóre, ciśnienie zewnętrznego powietrza nie stanowi już przeszkody, jeżeli bowiem utrudnia ono, przy znacznem rozrzedzeniu powietrza w kloszu, ruch podnoszącego się tłoka, to o tyle też ułatwia ruch drugiego opuszczającego się

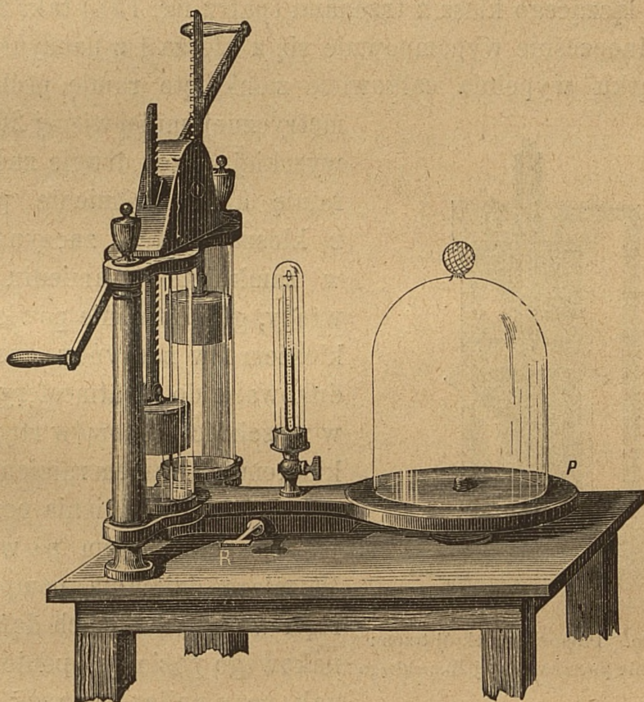


Fig. 138. Zewnętrzny widok dwutrzonowej maszyny pneumatycznej.

tłoka tak, że cały proces rozrzedzania przy końcu doświadczenia dokonywa się również łatwo, jak w początku. Figura 138 przedstawia dwutrzonową maszynę pneumatyczną w całości. Kanał, łączący oba trzony, również jak i odnoga tego kanału, kończąca się pośrodku talerza, ukryte są we wnętrzu podstawy pompy. Na talerzu, jak powiedzieliśmy, dokładnie wypolerowanym, umieszcza się klosz, po uprzedniem powleczeniu jego brzegów tłustością, a to w celu uniemożliwienia dostępu powietrza. Gdy naczynia.

z których chcemy wypompować powietrze lub inny gaz, mają kształt rur, balonów i t. p., wtedy mogą one być bezpośrednio przyszrubowane nad otworem kanału.

Stopień rozrzedzenia powietrza pod kloszem mierzy się za pomocą skróconego barometru, czyli tak zwanej *próbki barometrycznej*, znajdującej się w szklanem, zakończonem mosiężną oprawą naczyńku, które można przyszrubować do kanału przewodniego, łączącego klosz z trzonami (patrz fig. 138) tak, że powietrze jednocześnie wypompowuje się z klosza i z naczyńka. Rtęć z początku wypełnia całkowicie zamknięte ramię próbki barometrycznej, mniej więcej 20 centym. wysokiej, przez drugie zaś otwarte ramię działa ciśnienie powietrza z klosza. Rtęć zaczyna spadać w zamkniętem ramieniu dopiero wtedy, gdy ciśnienie powietrza pod kloszem i w naczyńku zostaje zredukowane do $^1/_4$ atmosfery; różnica w wysokości poziomów rtęci w zamkniętem i otwartem ramieniu, wskazuje wielkość ciśnienia pozostałego jeszcze pod kloszem p o w i e t r z a. W miarę działania pompy, słupy rtęci w obu ramionach dążą do jednakowego poziomu, ponieważ jednak, przy najlepiej nawet urządzonej pompie, nie można w kloszu wytworzyć absolutnej próżni, rtęć w ramieniu zamkniętem stoi zawsze nieco wyżej, niż w otwartem.

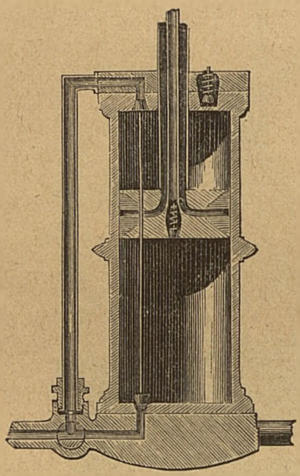


Fig. 139. Pionowy przekrój trzonu w maszynie pneumatycznej Bianchi'ego.

Istnieją także maszyny o jednym trzonie, w których powietrze zostaje wyciągnięte nietylko przy podnoszeniu tłoka, lecz także przy jego obniżaniu, a to dzięki bardzo dowcipnemu urządzeniu, zastosowanemu po raz pierwszy przez Bianchi'ego. Podajemy tu opis najbardziej używanej maszyny tego rodzaju, zbudowanej przez tego ostatniego. Trzon tej maszyny (fig. 139) jest zamknięty z obu stron i podzielony przez sam tłok na dwie

części (jedna nad, druga—pod tłokiem), komunikujące z kloszem za pomocą dwóch rurek, kończących się jedna w górnej, druga zaś—w dolnej polowie trzonu. Jeden i ten sam pręt, przechodzący przez tłok i poruszający się wraz z nim, zamyka oba otwory za pomocą korków stożkowatych; w pokrywce trzonu oraz w samem wnętrzu tłoka znajdują się otwory z klapami, przyciskanemi przez sprężyny i otwierającemi się tylko ku górze. Figura 139 przedstawia wnętrze trzonu w chwili, gdy tłok podnosi się ku górze. Otwór górnej rurki zostaje wtedy zamknięty przez górny stożek, powietrze zaś znajdujące się nad tłokiem, będąc zgęszczane, podnosi w końcu klapę w górnej pokrywce trzonu i wychodzi na zewnątrz tak długo, dopóki tłok nie zajmie najwyższego położenia. Jednocześnie przez otwartą, wskutek podniesienia się pręta z korkami stożkowatemi, dolną rurkę, powietrze z klosza przechodzi do próżni, powstającej pod podnoszącym się tłokiem. Przeciwnie, przy opuszczaniu tłoka, otwór dolnej rurki się zamyka, a powietrze, znajdujące się pod tłokiem, będąc zgęszczane, podnosi klapę w tłoku i wychodzi na zewnątrz; jednocześnie zaś, przez otwartą teraz górną rurkę, powietrze z klosza przechodzi do przestrzeni po nad tłokiem. Widzimy tedy, że maszyna Bianchi'ego, jakkolwiek tylko jednotrzonowa, przedstawia te same korzyści co i maszyny dwutrzonowe; jest ona nadto wygodniejszą od nich z powodu lepszego mechanizmu, poruszającego tłok. Mianowicie trzon tej maszyny (patrz tablicę, przedstawiającą maszynę Bianchi'ego w całości) przytwierdzony jest do mogącej się obracać poprzecznej osi, tłok zaś połączony jest za pomocą systemu kół zębatych z kolem rozpędowem, obracanem przez korbę. Przy obracaniu koła rozpędowego, tłok podnosi się i obniża, przechylając się jednocześnie, wraz z ruchomym trzonem, ruchem wahadłowym to w jednę, to w drugą stronę. W ten sposób niewygodny ruch korby w zwykłej maszynie dwutrzonowej jest tu zastąpiony przez prostszy ruch obrotowy, który nadto, wskutek znacznego ciężaru koła rozpędowego, jest bardziej jednostajny. Pompa Bianchi'ego pozwala w krótkim czasie rozrzedzić powietrze w bardzo wielkiem nawet naczyniu.

Powiedzieliśmy wyżej, że nawet za pomocą najlepiej zbudowanej pompy pneumatycznej nie można wywołać zupełnej próżni w danej przestrzeni, a to dla następujących powodów: 1) Działanie maszyny pneumatycznej polega na kolejnem rozrzedzaniu. Otóż przypuśćmy, dla prostoty rachunku, że objętość trzonu od dna do powierzchni tłoka w chwili, gdy ten ostatni zajmuje najwyższe położenie, równa się wewnętrznej objętości klosza i kanału łączącego; wtedy, jak już wiemy, po 1-szem podniesieniu tłoka, powietrze w kloszu zostaje rozrzedzone do $^1/_2$, po 2-iem—do $^1/_4$, po 3-iem—do $^1/_8$, po 4-em—do $^1/_{16}$ i t. d. W ten sposób gęstość powietrza staje się wprawdzie coraz mniejsza, lecz nigdy nie staje się równą O, mogłoby to nastąpić tylko po *nieskończenie wielu* poruszeniach tłoka; za pomocą najdoskonalszej więc pompy nie możemy otrzymać zupełnej próżni, możemy tylko mniej lub więcej zbliżyć się do niej. Dotyczy to zarówno tych maszyn, które już opisaliśmy jak i tych, których opis poniżej podajemy. 2) Klapy lub stożki nigdy nie zamykają hermetycznie, co przy daleko już posuniętem rozrzedzeniu działa bardzo szkodliwie. 3) Materyał, używany do smarowania różnych części przyrządu, pochłania powietrze, wchodzące, przy podnoszeniu tłoka, do przestrzeni o rozrzedzonem już powietrzu. Niedogodność tę udało się za pomocą rozmaitych sposobów zmniejszyć, lecz nie zupełnie usunąć. 4) W najlepiej nawet zbudowanej maszynie z tłokiem, ten ostatni nigdy nie przylega szczelnie do dna trzonu, a ponieważ przy obniżaniu się tłoka, znajdująca się w nim klapa, prowadząca na zewnątrz, otwiera się, przeto przy najniższem położeniu tłoka, przestrzeń pomiędzy dolną jego powierzchnią a dnem trzonu—zwana *przestrzenią szkodliwą*—wypełnia się zewnętrznem powietrzem o ciśnieniu 1 atmosfery. Przypuśćmy, że objętość przestrzeni szkodliwej wynosi tylko $^1/_{1000}$ objętości całego trzonu (od dna do powierzchni tłoka w chwili, gdy ten ostatni zajmuje najwyższe położenie), wtedy przy całkowitem podniesieniu tłoka, powietrze, wypełniające szkodliwą przestrzeń, rozszerza się 1000 razy, ciśnienie więc jego spada do $^1/_{1000}$ atmosfery. Otóż łatwo zrozumieć, że jeżeli powietrze w kloszu dosięgło tego samego stopnia rozrzedzenia, to przy otwartej nawet komunikacyi między klo-

szem i trzonem, nie będzie ono już przechodziło z pierwszego do drugiego, zachodzi to bowiem tylko dopóty, dopóki ciśnienia w obu tych przestrzeniach są różne; od chwili więc wyrównania się ciśnień dalsze pompowanie będzie zupełnie bezskuteczne. I tę trudność udało się w części przynajmniej usunąć.

Z powodów wyżej wymienionych, za pomocą najlepszej nawet maszyny pneumatycznej nie można ciśnienia powietrza albo innego gazu, zawartego w jakiemś naczyniu, zredukować bardziej, niż do ciśnienia 1 milimetrowego słupa rtęci, t. j. do $^1/_{760}$ atmosfery. W przemyśle, gdzie pompy pneumatyczne bywają używane do takich naprzykład celów, jak rozrzedzenie powietrza pod filtrem, przez który ma być przeciśnięty roztwór cukru, tak wielka ścisłość nigdy nie jest konieczna, dlatego też odnośne pompy są bardziej wygodne, niż dokładne.

Zupełnie odmienną budowę mają t. zw. pompy rtęciowe. Próżnia, jaka się tworzy w rurce barometrycznej przy wykonywaniu doświadczenia Toricelli'ego, jest o wiele dokładniejsza od tej, jaką można otrzymać za pomocą tłoka, poruszającego się w trzonie pompy. Mając to na względzie, niemiecki mechanik Geissler podjął na nowo myśl zbudowania pompy pneumatycznej, w której rtęć, kolejno podnoszona i opuszczana, pełniłaby rolę tłoka i wytwarzala próżnię, do którejby można następnie wprowadzać powietrze, wydalane z klosza lub innego naczynia. Oto opis takiej pompy, urządzonej podług modelu Geisslera i udoskonalonej przez Alvergniat'a. Przyrząd, prawie całkowicie szklany, składa się z dwóch zbiorników *A* i *B* (fig. 140 i 141, str. 184), połączonych ze sobą za pomocą rurki barometrycznej *T*, długości mniej więcej 1 metra oraz rurki kauczukowej *C*. Zbiornik *B* i rurka *T* są stale przymocowane do pionowej deski; zbiornik zaś *A*, swobodny i otwarty, może być podnoszony lub opuszczany na 1 metr. Tę zmianę położenia osiąga się za pośrednictwem długiego sznura, przymocowanego z jednej strony do zbiornika *A*, następnie przerzuconego przez blok *a* i dalej nawiniętego na takież kółko *b*, które można obracać za pomocą korby. Nad zbiornikiem *B* znajduje się kran *n* o trzech kanalach (przedstawiony oddzielnie na figurze w 3 różnych położeniach *X*, *Y* i *Z*,)

z którego wychodzi rurka *d;* na lewo zaś widać zwyczajny kran *m*, przez otworzenie którego zbiornik *B* może być połączony z naczyniem rtęciowem *v* i z atmosferą. Rurka *d* nie komunikuje bezpośrednio z naczyniem, w którem chcemy wywołać próżnię, lecz z naczyniem *o*, w części napełnionem kwasem siarczanym,

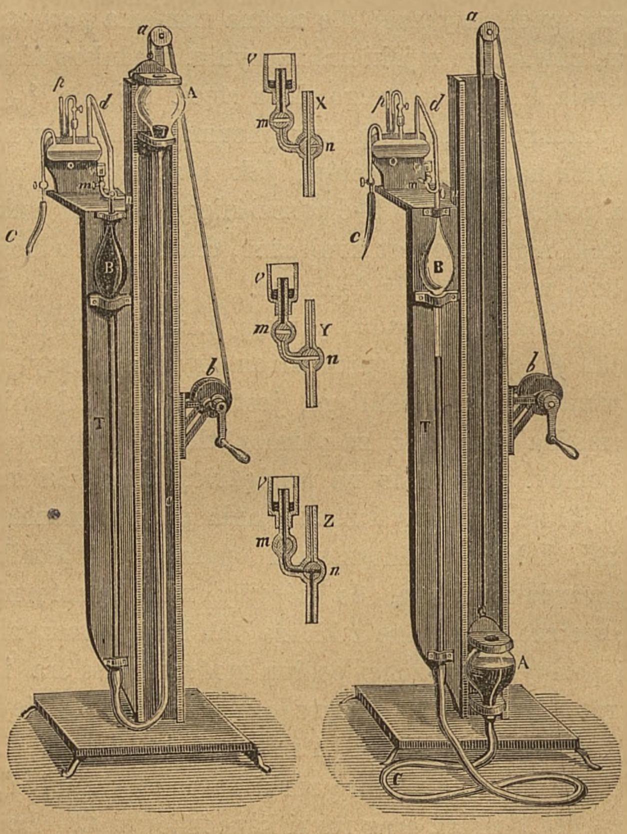


Fig. 140. Fig. 141. Rtęciowa maszyna pneumatyczna.

służącym do wysuszania powietrza lub innych gazów, wchodzących do przyrządu. Dopiero rurka kauczukowa *c* ustanawia komunikacyę pomiędzy kloszem a naczyniem *o*, do którego przyszrubowana jest próbka barometryczna *p*, wskazująca stopień rozrzedzenia.

Gdy zbiornik *A* zajmuje najwyższe położenie (fig. 140) i gdy przytem kran *m* jest otwarty, a kran *n* obrócony tak, jak widzimy w *Z*, wtedy rurki *C* i *T*, cały zbiornik *B* i naczynie *v* są napełnione rtęcią. Po zamknięciu krana *m*, obróceniu krana *n*, jak to widzimy w *Y* oraz po opuszczeniu zbiornika *A* (fig. 141), rtęć obniża się w zbiorniku *B* i w rurce *T* tak długo, dopóki różnica poziomów w rurce *T* i w zbiorniku *A* nie staje się równą wysokości barometrycznej, wskutek czego w zbiorniku *B* tworzy się próżnia. Wtedy obraca się kran *n* tak, jak widzimy w *X*, a powietrze lub inny gaz z klosza przechodzi przez rurkę *c*, naczynie *o* i rurkę *d* do zbiornika *B*, obniżając jeszcze bardziej poziom rtęci w rurce *T*. Wreszcie po sprowadzeniu kranów do pierwotnego położenia (fig. *Z*) i podniesieniu zbiornika *A*, rtęć znów wypełnia rurkę *T* i zbiornik *B*, wypychając przytem, przez krany *n* i *m*, powietrze lub inne gazy, które tutaj dostały się z klosza. Powtarzając tę samą operacyę po wiele razy, dochodzimy do tego, że próbka barometryczna *p* nie wskazuje żadnej prawie różnicy poziomów w obu ramionach.

Opisana przez nas pompa rtęciowa pozwala rozrzedzić gaz do $^1/_{10}$ milimetra ciśnienia, pod warunkiem, aby rtęć była zupełnie sucha. Lecz, jak czytelnik z powyższego może się przekonać, działanie tej pompy jest bardzo powolne i dlatego też bezpośrednio używa się jej tylko do wytworzenia próżni w małej przestrzeni. Gdy ma się do czynienia z wielkiemi naczyniami, wtedy za pomocą zwykłej pompy pneumatycznej rozrzedza się gaz, zawarty w nich, do 10 milimetrów ciśnienia, a następnie dopiero, w celu dalszego rozrzedzenia, używa pompy rtęciowej.

Pompa rtęciowa Sprengl'a,—polegająca na zupełnie odmiennej zasadzie, której nie możemy tu wyłuszczyć,—ma tę wyższość nad opisaną wyżej pompą Geisslera, że nie wymaga krana o trzech kanałach czyli drogach, który trudno jest zbudować i odpowiednio nastawiać oraz, że działanie jej w rozrzedzaniu gazu jest ciągłe.

Przez pewien czas używano pompy pneumatycznej do poruszania wagonów kolei żelaznej bez udziału lokomotywy. Zasada tego jest bardzo prosta, a zastosowanie praktyczne polega na tem,

że na całej długości ulicy układa się rurę metalową, wszędzie jednakowo szeroką, w której porusza się szczelnie przystający tłok. Gdy za pomocą pompy pneumatycznej powietrze po jednej stronie tłoka zostaje rozrzedzone i gdy druga jego strona ulega ciśnieniu atmosferycznemu, to ostatnie pcha tłok przed sobą; wraz z tłokiem może się poruszać, bez udziału innych motorów, szereg wagonów, których koła biegną po szynach, ułożonych wzdłuż rury.

Myśl o spożytkowaniu ciśnienia atmosferycznego jako motoru jest już dawna, być może tak dawna, jak wynalezienie pompy pneumatycznej i prawdopodobnie Otto von Guericke, wykonywując swoje doświadczenia, miał podobne cele na widoku. Lecz dopiero w roku 1810 pewien szwedzki inżynier Medhurst podał projekt przesyłania towarów, pakietów i listów przez rury, w których rozrzedzano powietrze; nieco później tenże inżynier próbował, z niezupełnie zadawalniającym skutkiem, przenosić ruch tłoka na wagony, biegnące na zewnątrz rury, w której tłok się poruszał. W roku 1824 pewien anglik, nazwiskiem Wallance wpadł na pomysł, żeby pozwolić ciśnieniu atmosferycznemu działać bezpośrednio na same wagony, pomieszczone wewnątrz rury, w której poruszał się tłok. Wreszcie angielscy inżynierowie Clegg i Samuda, porzuciwszy ostatni projekt, powrócili do systemu Medhurst'a i im też udało się urzeczywistnić myśl atmosferycznej kolei żelaznej: pod ich kierownictwem zbudowano w r. 1838 w Irlandyi, pomiędzy Kingstown i Dalkey, na długości 3 kilometrów, taką kolej, przez dłuższy czas będącą w ruchu. Po udatnej tej próbie zbudowano jeszcze kilka innych linii w Anglii i Francyi, obecnie wszakże zupełnie zarzucono ten sposób transportowania wagonów, nie dlatego, ażeby stanęły mu na przeszkodzie jakiekolwiek mechaniczne trudności, lecz jedynie z powodu, że koszta okazały się zbyt wysokie. Koleje żelazne atmosferyczne nie mogą rywalizować z kolejami parowemi, szczególniej po wynalezieniu lokomotywy górskiej, pozwalającej wagonom wspinać się pod górę; dlatego też ciśnienie atmosferyczne spożytkowywa się najwyżej przy przesyłaniu listów i małych pakietów.

§ 3. Ściśliwość gazów. Pompy zgęszczające.

Widzieliśmy w poprzednim paragrafie, w jaki sposób można rozrzedzić powietrze lub inny gaz w danej przestrzeni. Przeciwnie, chcąc zgęścić w jakiemś naczyniu powietrze lub inny gaz, używa się do tego przyrządu, zwanego *pompą zgęszczającą*, której budowa może być taka sama, jak i budowa pompy pneumatycznej, z warunkiem, ażeby wszystkie klapy otwierały się w kierunku przeciwnym, to jest tylko ku dołowi. Fig. 142 pokazuje przecięcie trzonu pompy zgęszczającej. Przy podnoszeniu tłoka, stożek *a*, zwrócony podstawą ku dołowi, zamyka otwór kanału, łączącego trzon z kloszem pompy, natomiast zewnętrzne powietrze cisnąc na klapę *b*, otwiera ją i wchodzi pod tłok. Przy opuszczaniu natomiast tłoka, ściskane powietrze zamyka klapę *b*, spycha zaś nieco stożek *a* i dostaje się przez kanał do klosza. Widzimy tedy, że istotnie zwyczajna pompa pneumatyczna, lecz o odwrotnym ruchu klap, może służyć jako pompa zgęszczająca, przyczem klosz powinien posiadać bardzo mocne ścianki, ażeby mógł wytrzymać wewnętrzne ciśnienie zgęszczanego powietrza lub innego gazu. Zbudowano także podobną pompę o dwóch trzonach, którą można jeszcze napotkać w starych zbiorach. Lecz w tym wypadku ciśnienie atmosferyczne, jakie trzeba przezwyciężać przy podnoszeniu jednego z tłoków, nie zostaje zrównoważone, jak w pompie pneumatycznej, przez ciśnienie na drugi tłok; owszem opór jest tutaj podwójny tak, że przyrząd jest jedno-

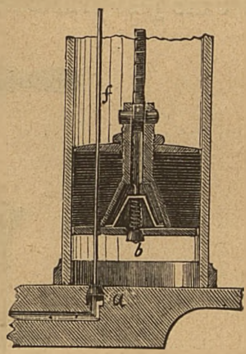
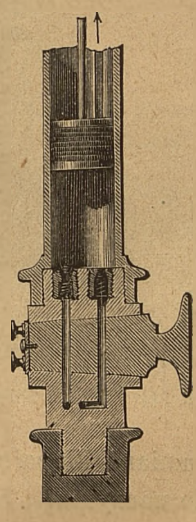


Fig. 142. Pompa zgęszczająca. Przecięcie trzonu.


Fig. 143. Pompa zgęszczająca Silbermana. Przecięcie trzonu.

cześnie kłopotliwy, duży i nie dość wytrzymały. Zarzucono go też zupełnie i zastąpiono pompą o jednym trzonie. Najczęściej używaną jest jednotrzonowa pompa Silbermana, której wewnętrzne urządzenie łatwo zrozumieć można z fig. 143 (str. 187). Tłok nie jest przedziurawiony, lecz u spodu jego znajdują się dwa kanały, przechodzące w rurki; jeden kanał (na rysunku lewy) jest zamknięty przez klapę, otwierającą się tylko ku górze, drugi zaś (na rysunku prawy) — przez klapę otwierającą się tylko ku dołowi. Lewy kanał łączy się ze zbiornikiem powietrza lub jakiegokolwiek innego gazu, prawy zaś — z naczyniem, w którem chcemy zgęścić powietrze lub dany gaz. Przy podnoszeniu tłoka, gaz ze zbiornika wchodzi do pompy, otwiera lewą klapę i napełnia trzon; przy opuszczaniu tłoka, wspomniana klapa się zamyka, prawa zaś otwiera i gaz przechodzi do naczynia. Pompa Silbermana, przedstawiona w całości na fig. 144, może być także użyta jako pompa pneumatyczna, przyczem lewy kanal łączy się z kloszem, prawy zaś, w tym wypadku otwarty, prowadzi wprost do zewnętrznej atmosfery. Lecz

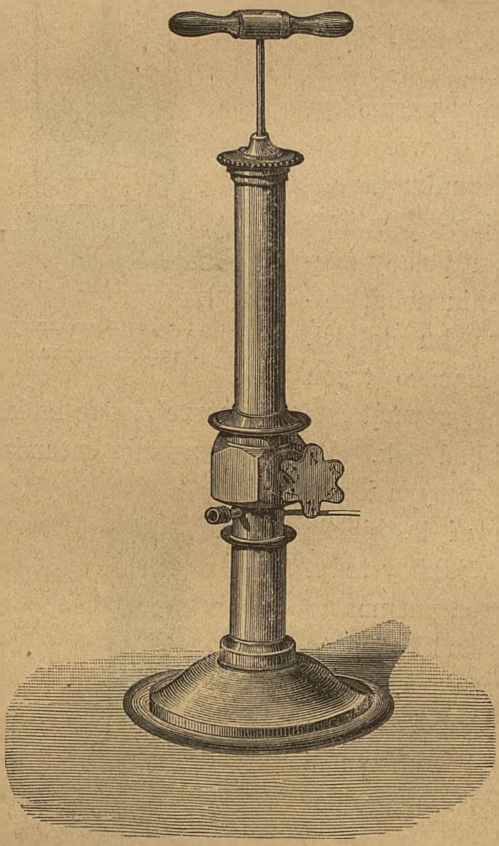


Fig. 144. Pompa Silbermana. Wygląd zewnętrzny.

rozrzedzenie za pomocą tego przyrządu nie może być bardzo daleko posunięte z powodu szkodliwych przestrzeni przy klapach.

Przy doświadczeniach nad prawem Boyle'a—Mariotte'a, uczony francuzki Regnault posługiwał się przyrządem, który pozwolił mu zgęścić gaz do 30 atmosfer; przyrząd ten składał się

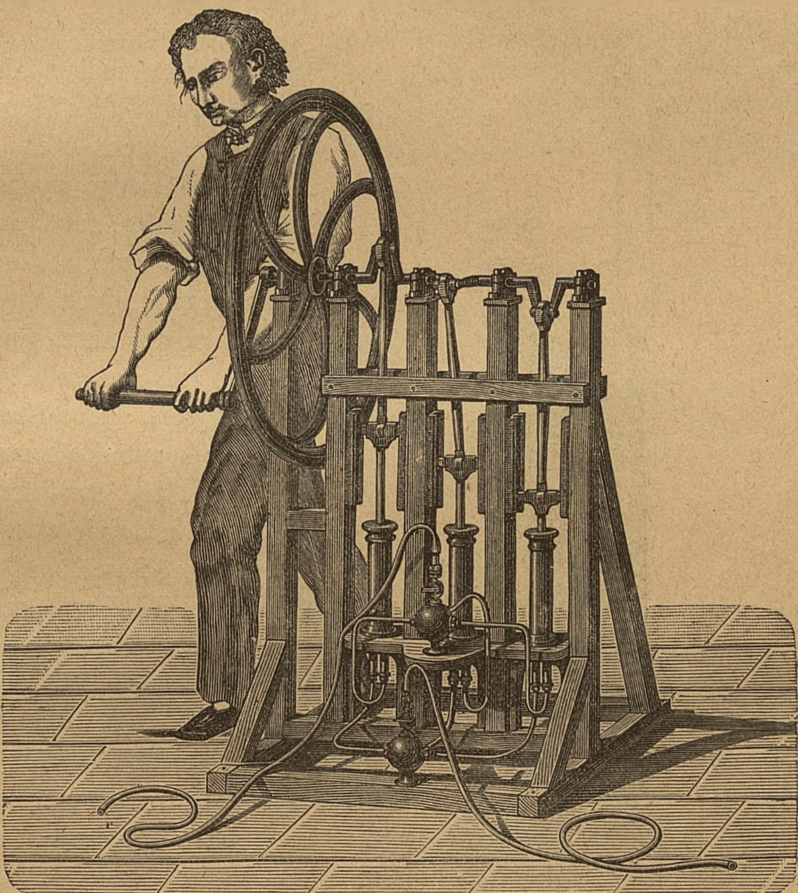


Fig. 145. Połączone pompy Silbermana.

z trzech pomp Silbermana, połączonych tak, jak pokazuje fig. 145. Drągi trzech tłoków dochodzą do trzech odpowiednio zgiętych części, stanowiących jednę wspólną oś, przechodzącą przez duże koło, obracane za pomocą korby. Przewody, wsysające gaz z jednej strony i przewody, wypuszczające go z drugiej, otwierają się

do okrągłych naczyń, które są bezpośrednio połączone, jeden z gazometrem napełnionym danym gazem, drugi—ze zbiornikiem, w którym gaz ma uledz zgęszczeniu.

Zwróćmy się obecnie do opisu kilku ważniejszych zastosowań zgęszczonego powietrza.

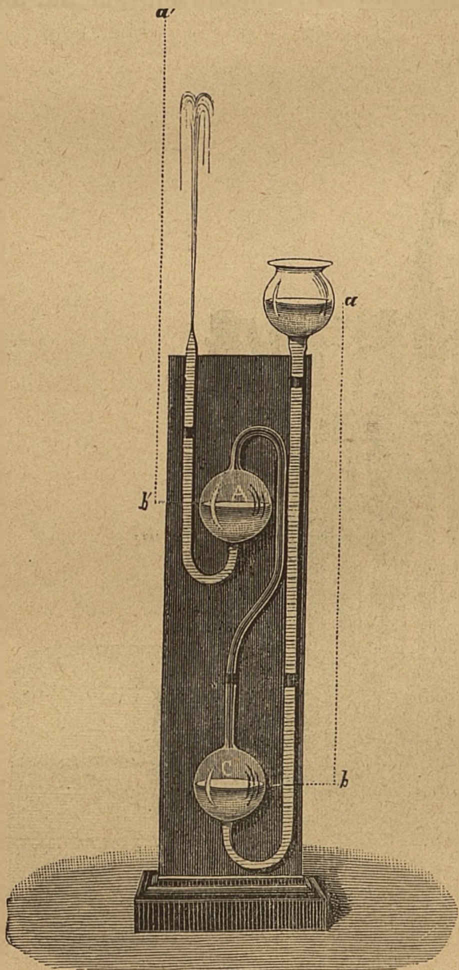


Fig. 146. Fontanna Herona.

Fontanna Herona (fig. 146) polega właśnie na działaniu takiego powietrza. Składa się ona z naczynia *A*, z dna którego wychodzi ku górze rurka, zakończona maleńkim otworem; druga rurka, otwierająca się do górnej części naczynia *A*, łączy je z naczyniem *C*, głębiej leżącem. To ostatnie wreszcie komunikuje z wstępującą rurką, rozszerzoną u góry w kształcie otwartej kolby. Jeżeli w *A* znajduje się woda i jeżeli wstępującą rurkę również będziemy napełniali wodą, która spływa do naczynia *C*, wtedy w rurce pomiędzy *A* i *C* znajduje się uwięzione powietrze, będące pod ciśnieniem 1 atmosfery, powiększonem o ciśnienie słupa wody *a b* i zgęszczone pod wpływem tegoż ciśnienia. To zgęszczone powietrze, cisnąc z kolei na poziom wody w naczyniu *A*, powoduje podnoszenie się jej w rurce, z której woda wytryskuje jak z fontanny; wysokość, na jaką woda wznosi się po nad poziom w *A*, byłaby równą wysokości nadmiarowego cisnącego słupa *a b*

cieczy, gdyby nie znany nam już wpływ oporu zewnętrznego powietrza oraz kropel opadających.

Pompa pożarna (fig. 147) przedstawia przyrząd, w którym prawidłowść i ciągłość wypływu wody osiąga się przez jednoczesne działanie masy zgęszczonego powietrza oraz dwóch pomp tłoczących. Dwie te pompy, poruszane za pomocą wspólnego poziomego drąga, do którego naraz może przystąpić ośmiu ludzi, są zanurzone w obszernym zbiorniku, napełnionym wodą przez cały czas działania przyrządu. Klapy są tak urządzone, że gdy jedna pompa wsysa wodę ze zbiornika do trzonu, druga wtłacza ją

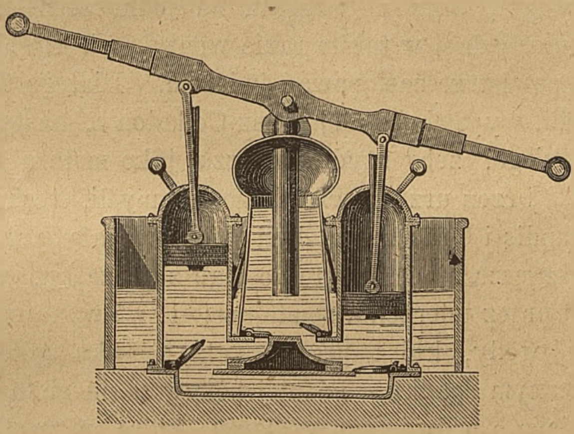


Fig. 147. Pompa pożarna.

do środkowego rezerwoaru, w którym znajduje się zgęszczone powietrze; ztąd woda zostaje wtłoczona do długiej rury skórzanej, którą skierowywa się na płomień. Ponieważ tłoki poruszają się jednocześnie w taki sposób, że gdy jeden się podnosi, drugi się opuszcza, to woda ciągle przybywa do rezerwoaru środkowego i strumień, wypływający z rury, jest ciągły. Pompa pożarna może być tak urządzona, ażeby tłoki były poruszane przez niewielki motor parowy. Pompa taka, dość często używana, wyrzuca w przeciągu minuty 900 litrów wody i daje strumień, mający 43 metry wysokości.

Do najwspanialszych dzieł, jakie wiekowi naszemu, dzięki umiejętności zastosowywania wyników nauki do potrzeb życio-

wych, udało się wykonać, należy bez wątpienia przebicie ogromnych mas skalistych, czyli budowa tunelów w twardym kamieniu, nad któremi góry wznoszą się na tysiące jeszcze stóp. Pierwszem z takich olbrzymich dzieł jest przebicie tunelu przez górę Cenis, łączącego Francyę z Włochami; drugiem, jeszcze trudniejszem—przeprowadzenie tunelu przez górę św. Gotarda, łączącego Szwajcaryę z Włochami. Przy budowie pierwszego, posługiwanie się prochem lub parą, jako motorami maszyny wiercącej, przedstawiało wielkie trudności, a nawet niebezpieczeństwo, ze względu na szybkość, z jaką powietrze zużywałoby się wskutek spalania prochu lub węgla, oraz ze względu na jednoczesną niemożność urządzenia niezbędnej w takim razie wentylacyi, którąby pozwoliła zepsute powietrze zastępować świeżem. Dlatego też powrócono do myśli, wypowiedzianej przez Colladon'a, następnie także przez Caligny'ego, żeby użyć powietrza jako motoru do maszyn wiercących. Przez urzeczywistnienie tej myśli, technicy Sommeillier, Grandis i Grattone zdobyli sobie niespożytą sławę.

Pompy zgęszczające, użyte do tego z początku, wprawiane były w ruch przez uderzenia spadającej i w swym spadku zatrzymywanej wody, która przypływała z kilku górskich strumieni o znacznym spadku. Później pompy takie zastąpiono pompą zgęszczającą o podwójnem działaniu, która pozwoliła spożytkować na większą daleko skalę siły wodne, znajdujące się w pobliżu. Na jednej ze stacyj, niedaleko góry Cenis, ustawiono dwanaście pomp zgęszczających, poruszanych przez sześć kół wodnych, na które bezpośrednio działała spadająca woda z rzeczki Arc. Pompy te pozwalały w przeciągu 24 godzin zredukować przeciętnie 116000 metrów sześciennych zwyczajnego powietrza do jednej siódmej pierwotnej objętości tak, że w maszynach wiercących wywierały one na tłoki ciśnienie 7-miu atmosfer. Taka znaczna ilość powietrza nie byłaby potrzebna, gdyby chodziło jedynie o podtrzymanie ruchu maszyn, lecz rura, przeprowadzająca zgęszczone powietrze z pomp do wnętrza góry, służyła nietylko jako pośredniczka w przenoszeniu siły mechanicznej z wodospadów na świdry, wiercące skałę, ale także przynosiła do galeryj świeże powietrze, niezbędne dla oddychania robotników oraz dla palenia lamp, przyświecających ich robocie.

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

CENA 20 KOP.

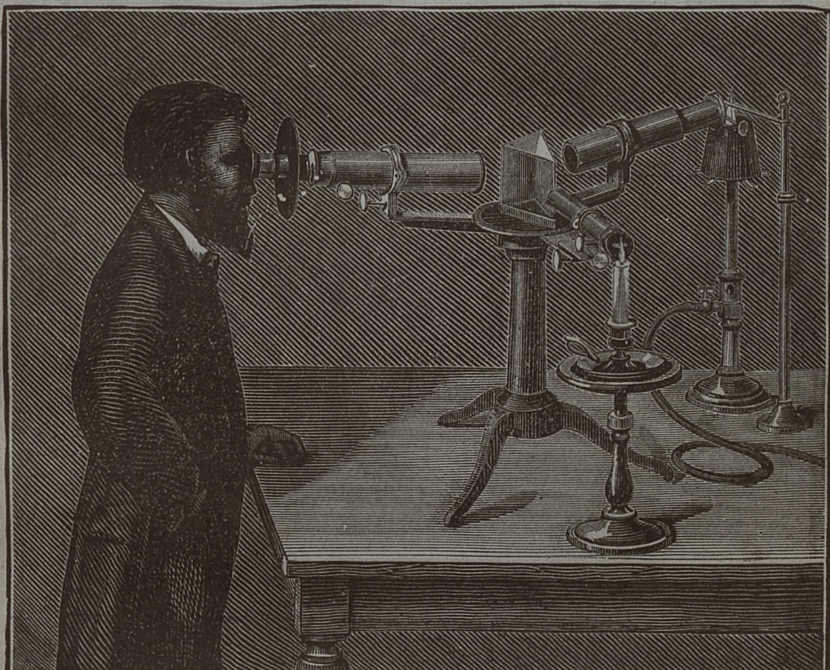
Zeszyt 7.

CENA 20 KOP.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła **A. Guillemin'a** „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

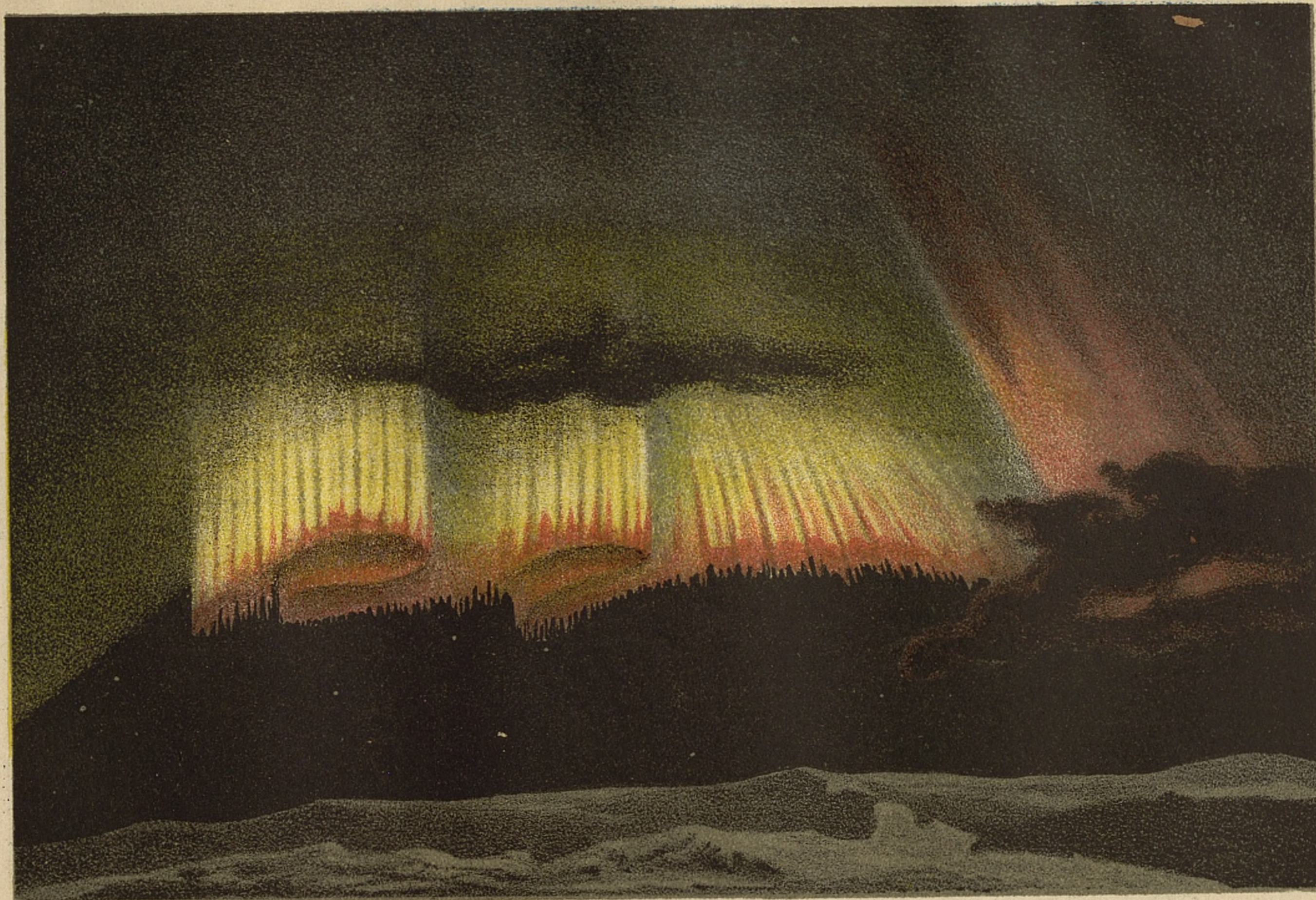
Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

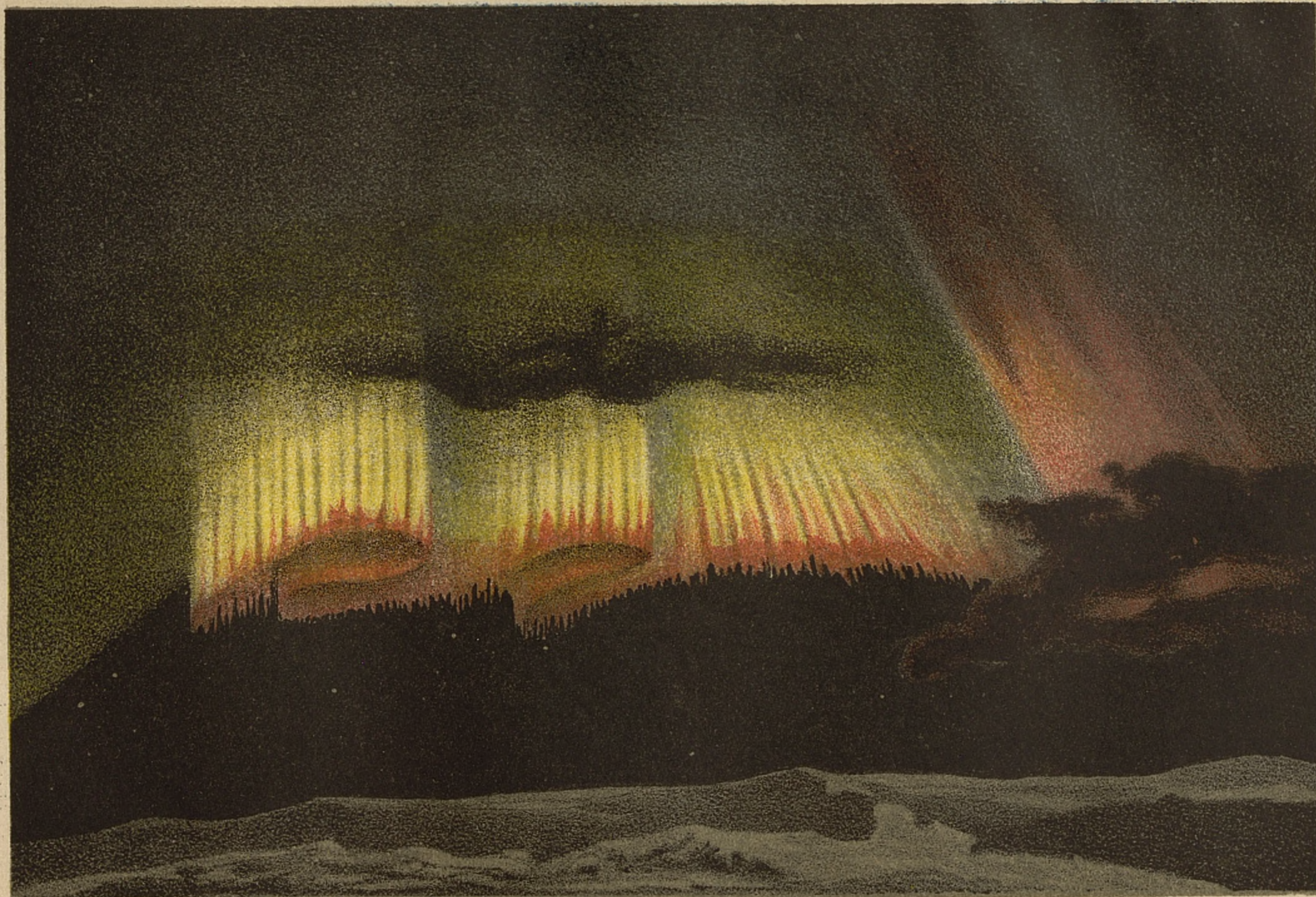
1889.



w lit. „Zofija" B. A. Bukaty Królewska.

I. Zorza północna

obserwowana w Bossekop 19 stycznia 1839 r. o godz. 7, m. 40 wieczorem.



w Lit. „Zofija" B. A. Bukaty Królewska.

I. Zorza północna

obserwowana w Bossekop 19 stycznia 1839 r. o godz. 7, m. 40 wieczorem.

W danym razie próby zastosowania zgęszczonego powietrza jako siły poruszającej w wypadkach, w których użycie pary napotkałoby na nieprzezwyciężone trudności, uwieńczone zostały tak pomyślnym rezultatem, że zaczęto coraz bardziej przemyśliwać nad tem, czyby nie można było z korzyścią spożytkować tej samej siły przy innych jeszcze robotach. I tak naprzykład w okolicach, bogatych w wodospady i wartkie rzeki, możnaby użyć naturalnych sił wodnych do zgęszczania powietrza, następnie zgęszczone to powietrze przeprowadzać przez rury do oddzielnych domostw rzemieślniczych, gdzie służyłoby jako motor. Podobnie więc jak w większych miastach, woda lub gaz oświetlający są rozprowadzane z centralnego punktu do pojedyńczych domów, tak też być może, że w przyszłości motory warsztatów będą poruszane zgęszczonem powietrzem, rozprowadzanem po mieście z jednej głównej stacyi.

Wspomnimy wreszcie o jednem jeszcze zastosowaniu zgęszczonego powietrza. Wiele lat temu zarząd telegrafu w Paryżu urządził pomiędzy dwiema stacyami miejskiemi komunikacyę przez rurę, w której za pomocą zgęszczonego powietrza przesyła się z jednej stacyi do drugiej listy i niewielkie pakiety. Rura ta, mająca długość 1100 metrów, średnicę zaś równą $6^1/_2$ centymetrom, rozszerza się na każdej z dwóch stacyj w skrzynkę, w którą wprowadza się lub też z niej wyciąga tłok, zawierający w swem wnętrzu dane posyłki. Chcąc wysłać napełniony niemi tłok, łączy się za pomocą kranu skrzynkę stacyi wysyłającej z pompą zgęszczającą, podczas gdy na stacyi odbierającej skrzynka ta komunikuje tylko z atmosferą. Zgęszczenie powietrza przy tej *poczcie pneumatycznej* osiąga się przez ciśnienie wody z miejskich wodociągów, działające na każdej stacyi prawie z taką siłą, jak gdyby woda spadała z wysokości 15 metrów. Powietrze nagromadza się w odpowiednio urządzonych zbiornikach i doprowadza do takiej gęstości, że w ciągu 90 sekund popycha ono tłok wzdłuż całej rury tak, że tenże porusza się ze średnią prędkością 12 metrów na sekundę. W Londynie istnieje poczta pneumatyczna, mająca 500 metrów długości; tutaj jako motory działają naprzemian zgęszczone i zwyczajne atmosferyczne powietrze.

Pomimo wielkich kosztów, system ten przedstawia znaczne korzyści dla rozległych i licznie zaludnionych miast, w których komunikacya pomiędzy oddzielnemi, bardziej oddalonemi od siebie częściami wymaga coraz więcej środków. Lecz inne, oprócz poczty pneumatycznej, próby zastosowania ciśnienia powietrza, jako środka lokomocyi, należy uważać obecnie tylko za ciekawe eksperymenty, które na małą skalę udaje się wprawdzie wykonać bez trudności, chcąc je jednak urzeczywistnić w większym zakresie, napotyka się na nieprzezwyciężone przeszkody.

ROZDZIAŁ XI.

Prawo Archimedesa w zastosowaniu do gazów.

§ 1. Pozorna strata na ciężarze ciała, znajdującego się w atmosferze gazowej. — Baroskop.

Na str. 150 opisaliśmy już mimochodem doświadczenia, dowodzące istnienia w gazach parcia z dołu do góry; obecnie wypada nam rzecz tę nieco bliżej rozważyć.

Wskutek wielkiej ruchliwości cząstek, wspólnej dla cieczy i gazów, niektóre prawa, dotyczące zachowania się pierwszych, stosują się także do ostatnich; tak gazy, oprócz prawa Pascala o jednostajnem rozchodzeniu się ciśnienia, podlegają także prawu Archimedesa, które w zastosowaniu do nich brzmi jak następuje: *każde ciało, znajdujące się w atmosferze jakiegoś gazu, pozornie traci ze swego ciężaru tyle, ile waży wypchnięty przez nie gaz.* Łatwo to wykazać za pomocą t. z. *baroskopu* [1]), wynalezionego przez Ottona von Guericke. Przyrząd ten składa się z krótkiego drąga wagowego, zaopatrzonego w strzałkę, która przy poruszeniach drąga posuwa się wzdłuż skali, naciętej na łuku. Na końcach drąga wiszą dwie kule — jedna duża i wydrążona, druga zaś mniejsza, lecz pełna — równoważące się w powietrzu (fig. 148).

---

[1]) Od greckiego wyrazu *barys* — ciężki.

Jeżeli umieścimy baroskop pod kloszem maszyny pneumatycznej, to w miarę wypompowywania z pod niego powietrza, duża kula, dokładnie poprzednio zrównoważona przez małą, będzie się coraz bardziej obniżała, stawała jakby cięższą. Proste to doświadczenie pokazuje, że w rzeczywistości duża kula waży więcej, niż mała: pod opróżnionym bowiem kloszem kule nie doznają już ciśnienia powietrza, a więc i parcia, wywieranego przez to ostatnie z dołu do góry i podlegają jedynie działaniu ciężkości. Jeżeli zaś, pomimo różnych ciężarów, kule te w powietrzu się równoważą, pochodzi to ztąd, że większa z nich, wypychając znaczniejszą objętość powietrza, więcej też pozornie traci ze swego ciężaru, niż mała. Różnica ta w stratach na ciężarze obu kul oczywiście równa się różnicy w ciężarze wypychanych przez nie objętości powietrza, i gdyby kule, równoważące się w powietrzu, posiadały jednakową objętość, to, będąc pomieszczone pod opróżnionym kloszem maszyny pneumatycznej, równowagi tej by nie utraciły.

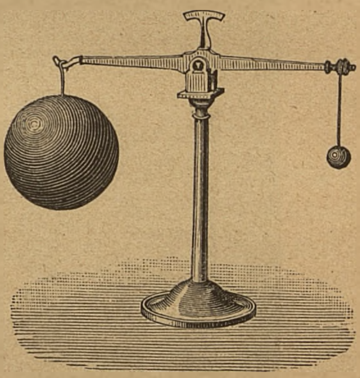


Fig. 148. Baroskop.

Z powyższego łatwo zrozumieć, że przy ważeniu, uskutecznianem zwykle w powietrzu, otrzymujemy nie rzeczywisty ciężar ważonego ciała, t. j. nie ciężar, jaki posiadałoby ono w próżni, lecz pozorny, mianowicie zmniejszony o ciężar równej mu objętości powietrza. To samo dotyczy wprawdzie gwichtów, za pomocą których ważymy, te jednak, jako specyficznie cięższe od większej części ważonych ciał, posiadają mniejszą od nich objętość, a więc wypychają mniej powietrza i tracą przeto mniej na ciężarze tak, że strata ich wynosi tylko część straty, jaką ponoszą ciała odważane.

Ponieważ 1 litr powietrza, przy ciśnieniu 1 atmosfery i przy temperaturze 0^0 waży tylko 1 gr., 293, a przy 15^0 C. — zwykłej temperaturze pokojowej — jeszcze mniej, błąd więc, jaki naprzykład popełniamy, przyjmując pozorny ciężar ważonego cia-

ła, objętości 1 litra, za jego ciężar rzeczywisty, jest tak nieznaczny, że w życiu praktycznem możemy go pominąć. Tam jednak, gdzie chodzi o bardzo dokładne ważenie, naprzykład dla celów naukowych, należy koniecznie uwzględnić ciężar wypchniętego powietrza, który łatwo obliczyć, znając ciężar ciał, pomieszczonych na szalkach, stan barometru i temperaturę, przy której odbywa się ważenie.

Z prawa Archimedesa w stosunku do gazów wynika dalej, że w wypadku, gdy objętość wypchniętego gazu waży tyleż,

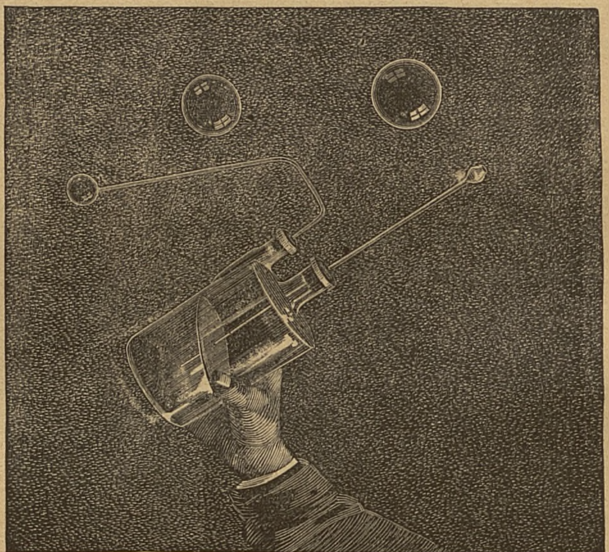


Fig. 149. Bańki mydlane, napełnione wodorem, podnoszą się w powietrzu.

co i zanurzone w nim ciało, innemi słowy, gdy gęstość tego ostatniego jest taka sama co i gazu, wtedy unosi się ono w nim swobodnie, t. j. nie spada na dół, ani też wznosi do góry; z góry bowiem na dół działa na nie własny jego ciężar, z dołu zaś do góry — równe temu ciężarowi parcie gazu.

Nareszcie w razie, gdy ciało waży mniej, niż równa objętość gazu, wtedy podnosi się ono w nim do góry, podobnie jak to czyni korek, zanurzony w wodzie. Black, profesor fizyki w Edynburgu, podczas wykładów mianych w 1767, r. głosił już, że pęcherz

napełniony wodorem, podnosiłby się zapewne w powietrzu; nie wykonał on jednak nigdy podobnego doświadczenia, uważając takowe za zabawkę. Dopiero w r. 1782 Cavallo zakomunikował towarzystwu królewskiemu w Londynie rezultaty doświadczeń, wykonanych z bańkami mydlanemi, wypełnionemi wodorem, które same przez się podnosiły się w powietrzu (fig. 149), dla tego, że bańka taka wraz z zawartym w niej wodorem waży mniej, niż równa objętość powietrza.

§ 2. Balony. Podróże nadpowietrzne.

Na omówionej w końcu poprzedniego paragrafu zasadzie polegają t. z. balony. Są to od spodu otwarte, wydrążone kule z lekkiej i nieprzenikliwej dla gazów materyi, które, będąc wypełnione ogrzanem powietrzem, wodorem, gazem oświetlającym lub jakimkolwiek innym gazem, lżejszym od zwykłego powietrza, wznoszą się w niem dzięki stosunkowej swej lekkości.

Wynalazek balonów zawdzięczamy braciom Montgolfier, fabrykantom papieru w małem miasteczku francuzkiem Annonay, gdzie 5 czerwca 1783 r. po raz pierwszy puszczono balon, napełniony powietrzem, ogrzewanem przez spalanie słomy, znajdującej się pod otworem balonu. Bracia Montgolfier wiedzieli już prawdopodobnie o wyżej wzmiankowanem doświadczeniu Cavallo, do pierwszych bowiem swych prób używali wodoru, przekonawszy się jednak, że gaz ten nader łatwo przenika przez powłokę balonu, zastąpili go ogrzanem powietrzem; od ich imienia też balony, napełnione tym ostatnim gazem, nazwano *montgolfierkami.*

Charles, profesor fizyki w Paryżu, zbudowawszy balon z jedwabnej materyi, przesiąkniętej kauczukiem, rozpuszczonym we wrzącym olejku terpentynowym, zdołał uczynić balon ten nieprzenikliwym dla wodoru i mógł użyć tego gazu zamiast ogrzanego powietrza. 27 sierpnia 1783 r. pierwszy taki balon, nazwany „Globe“, wzniósł się wobec tłumnie zebranych widzów, z pola Marsowego pod Paryżem i spadł po upływie niespełna godziny pod Gonesse, dosięgłszy wysokości przeszło 1000 metrów. Od

imienia Charles'a, balony napełnione wodorem, po raz pierwszy przezeń do tego celu użytym, nazwano *charlierkami*.

Podczas pierwszych prób puszczano balony bez pasażerów, myśl jednak, że za pomocą tych przyrządów ludzie także mogą wzbijać się w górne warstwy atmosfery była tak naturalną, że niedługo czekała na urzeczywistnienie. To też jeszcze w tym samym roku (1783) Pilâtre de Rozier i d'Arlandes odważyli się na taką podróż nadpowietrzną. Wzniósłszy się uprzednio kilka



Fig. 150. Montgolfierka, użyta przez Pilâtre de Roziera i d'Arlandesa do pierwszej podróży nadpowietrznej, 21 listopada 1783 r.

razy t. z. balonem uwięzionym (ballon captif), t. j. połączonym z ziemią za pomocą rozwijającej się liny, odbyli oni w końcu podróż w wolnej montgolfierce (fig. 150); wzbiwszy się na wysokość przeszło 2 kilometrów, przelecieli po nad Paryżem i szczęśliwie znowu spuścili się na ziemię w odległości 2 mil od miejsca wyjazdu. W ten sposób pierwsza próba zdobycia państwa atmosfery uwieńczona została pomyślnym skutkiem, a przykład ten rychło znalazł licznych naśladowców, pragnących zbadać wyższe

warstwy atmosfery i ewentualnie poczynić tam obserwacye naukowe. Niezawsze jednak podobne podróże przebiegały tak pomyślnie i niejeden aeronauta (pływak nadpowietrzny) przypłacił swą śmiałość życiem, jak to się stało naprzykład z samym Pilâtre de Rozierem, który chcąc przelecieć balonem ponad kanałem La Manche, oddzielającym Francyę od Anglji (co już przed nim inni szczęśliwie uskutecznili), wpadł wraz z balonem w morze i utonął.

Balon, unoszący się w powietrzu, znajduje się pod wpływem działania dwóch wręcz przeciwnych co do kierunku sił: własnego swego ciężaru, działającego nań z góry na dół i parcia z dołu do góry, równego ciężarowi wypchniętego przez balon powietrza. Siła więc, z jaką balon wznosi się do góry, równa się nadmiarowi ciężaru, wypchniętego przezeń powietrza nad ciężarem samego balonu; niechaj ten ostatni wraz z zawartym w nim gazem i wszelkiemi przynależytościami waży 100 kilogr., wypchnięte zaś powietrze 25 kil., wtedy pchany on jest przez siłę, równą ciężarowi 75 kilogr. Jeżeli przytem weźmiemy pod uwagę jedynie ciężar gazu, zawartego w balonie, pominiemy zaś wagę powłoki i balastu, to siła wznoszenia balonu, dopóki nie zostanie on całkowicie rozdęty przez zawarty w nim rozszerzający się gaz, pozostaje przybliżenie stałą, niezależnie od wysokości, na jakiej się znajduje. W samej rzeczy, gdy w górnych warstwach atmosfery, ciśnienie zewnętrznego powietrza zmniejszy się naprzykład do $1/2$, wtedy, według prawa Boyle'a-Mariotte'a, podwoi się także objętość zawartego w balonie gazu, a więc 2 razy większą też będzie objętość wypchniętego przez balon powietrza. Jednocześnie atoli i gęstości obu gazów (t. j. zewnętrznego powietrza oraz gazu, wypełniającego balon) będą, według tegoż prawa, 2 razy mniejsze, tak, że ani ciężar balonu, ściągający go ku dołowi, ani ciężar wypchniętego przezeń powietrza, pchający go do góry, a więc i siła wznoszenia balonu, równająca się nadmiarowi tego ostatniego ciężaru nad pierwszym, się nie zmienią. Gdy jednak powłoka balonu została już ostatecznie rozdęta tak, że objętość jego już więcej wzrastać nie może, wtedy przy dalszem jego wzbijaniu się w górę, siła wznoszenia zmniejsza się dlatego, że odtąd wypycha on stale jednakową objętość powietrza coraz to

rzadszego, a więc coraz to lżejszego. W końcu przeto musi nastąpić moment, w którym parcie z dołu do góry, przewyższające początkowo ciężar całego balonu, stanie się równem temu ciężarowi, wtedy zaś balon nie może się już wyżej wznosić, lecz unoszony przez prądy powietrzne, posuwa się w kierunku poziomym.

Zastosujmy teraz powyższe uwagi do poszczególnych rodzajów balonu i zacznijmy od montgolfierek. Dla ocenienia siły ich wzlotu, zauważmy, iż ciężar 1 metra sześc. powietrza, przy ciśnieniu dokładnie 1 atmosfery, wynosi:

Dla temperatury	0°	— 1293	gramów
„	10° C.	— 1247	„
„	50° C.	— 1093	„
„	100° C.	— 946	„

Niechaj temperatura otaczającego powietrza będzie 0°, wtedy siła wznoszenia balonu dla każdego metra sześc. zamkniętego w nim powietrza równa się przy 50° C. — 200 gramom, przy 100° C. — 347 gr. (pomijamy tu ciężar powłoki i balastu). Siła ta jeszcze się zwiększa przy wyższej temperaturze, trudno jednak powietrze, wypełniające balon, stale przy niej utrzymywać.

O wiele lepszemi pod omawianym tu względem są charlierki — balony, napełniane wodorem. 1 metr sześc. tego gazu przy ciśnieniu 1 atmosfery i temperaturze 0° waży tylko 96 gramów, dla każdego więc metra sześc. wodoru, przy podanych warunkach temperatury i ciśnienia i przy temperaturze 0° otaczającego powietrza, siła wznoszenia balonu równa się ciężarowi prawie 1200 gramów.

Do napełniania balonów bardzo często używają o wiele tańszego od wodoru gazu oświetlającego, po raz pierwszy zastosowanego do tego celu przez sławnego aeronautę angielskiego Greena. Siła jednak wznoszenia dla tego gazu jest o wiele mniejsza, niż dla wodoru, gęstość jego bowiem może wynosić aż do $^5/_8$ gęstości powietrza atmosferycznego. Glaisher radzi przeto używać jedynie gazu, wywiązującego się przy końcu destylacyi smoły z węgla kamiennego (z której otrzymuje się gaz oświetlający), jako lżejszego, niż gaz, wydzielający się w początku tegoż procesu. W czerwcu 1862 r., rzeczony badacz odbył podróż nadpo-

wietrzną balonem, napełnionym gazem oświetlającym, którego gęstość w stosunku do powietrza jako jedności, wynosiła tylko 0,36 i dla którego siła wznoszenia dla każdego metra sześc. wynosiła 830 gr., a więc przeszło $^2/_3$ siły wznoszenia dla wodoru.

Co się tyczy kształtu balonów, to montgolfierkom, jakoteż i charlierkom najlepiej jest nadawać postać walcowato lub stożkowato ku dołowi zaostrzonej kuli dlatego, że ze wszystkich brył o jednakowej objętości kula posiada najmniejszą powierzchnię: wybierając postać kulistą, sprawiamy więc, że ciężar powłoki, podtrzymywanej przez daną masę gazu, jest możliwie mały. Do tego przyłącza się jeszcze i ta okoliczność, że ciśnienie gazu, zamkniętego w powłoce, wtedy tylko jednostajnie rozmieszcza się po całej jej powierzchni, gdy powłoka ta jest kulistą tak, że zamknięty w balonie gaz już wskutek swej prężności usiłuje mu nadać tę postać. W montgolfierkach dolny otwór pozostaje niezamkniętym, podczas gdy w charlierkach należy takowy, po napełnieniu balonu, hermetycznie zamknąć, ażeby, o ile to jest możliwe, zapobiedz wypływowi gazu.

Powłoka balonu składa się z oddzielnych skrawków, rozszerzonych pośrodku i z obu stron ostro zakończonych, które zszywa się w ten sposób, że szwy biegną nakształt południków kuli, przyczem baczyć należy, aby nie pozostała szpara lub otwór, przez które gaz mógłby wypływać; rozumie się, że powłoka musi być wyrobiona z materyi nieprzenikliwej dla gazów, najlepiej z materyi jedwabnej, pokrytej stosownie przygotowanym werniksem. Balon obciągnięty jest siecią sznurów, szczelnie przylegających do górnej jego części i odstających od niego dopiero poniżej koła, przechodzącego w kierunku poziomym przez środek kuli; wszystkie sznury zbiegają się znów pod balonem, gdzie przyczepione są do mocnej drewnianej obręczy, na której wisi łódka dla aeronautów, balastu i t. d. (fig. 151, str. 202). Takie urządzenie przedstawia tę korzyść, że cały ciężar jednostajnie się rozkłada po powierzchni balonu, otoczonego sznurami, przez co najlepiej staje się zadość warunkom równowagi dla łódki i jej zawartości.

Zwróćmy się teraz do środków, jakiemi rozporządza aeronauta dla podnoszenia lub opuszczania balonu; dalej bowiem nie sięga jego władza, zwłaszcza zaś kierowanie balonem w kierunku poziomym, jak dotąd, wymyka się jeszcze z pod jego wpływu.

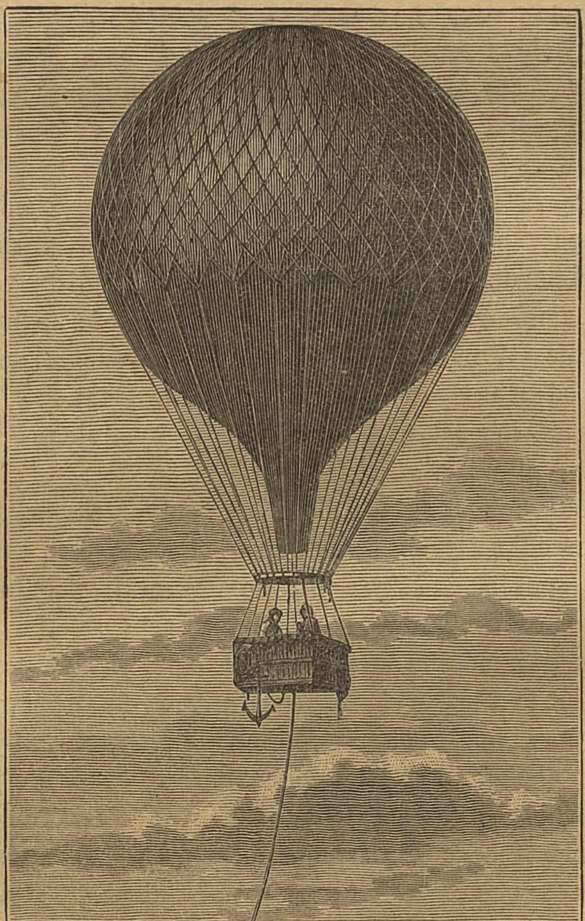


Fig. 151. Kształt balonu, napełnionego gazem.

Panujący w danej warstwie atmosfery prąd powietrzny unosi z sobą znajdujący się tam balon, nadając mu takąż prawie szybkość, z jaką porusza się sama masa powietrza tak, że siedzący w łódce nie czują prawie wiatru. Otóż jedyny środek nadawa-

nia balonowi ruchu w odpowiednim kierunku, polega na tem, aby pozwolić mu wznieść się lub spaść do takiej warstwy, w której panuje prąd powietrzny pożądanego kierunku. Widzimy, że i ten środek tylko wtedy może być zastosowany, gdy na jakiejś wysokości, do której balon dotrzeć jeszcze może, panuje w ogóle pożądany prąd powietrzny.

W montgolfierkach regulacya wznoszenia i spuszczania balonu połączona jest z wielkiemi trudnościami i w ogóle tylko wtedy jest możliwa, jeżeli balon zabiera z sobą przyrząd, służący do ogrzewania powietrza, jak lampy naftowe. Wzmagając płomienie lamp, sprawiamy, iż powietrze zawarte w balonie silniej się rozgrzewa i rozszerza, powiększając jego objętość, przez co balon wznosi się wyżej; przeciwnie, przy zmniejszaniu płomieni, powietrze wewnętrzne oziębiając się, kurczy się i balon zaczyna spadać. Cała jednak manipulacya jest tak niepewna, niebezpieczeństwo pożaru — tak wielkie, z drugiej zaś strony siła wznoszenia — stosunkowo tak nieznaczna, że oddawna już zarzucono montgolfierki, jako statki nadpowietrzne dla ludzi; przygotowują je jeszcze tylko na małą skalę, używając ich jako zabawek, które atoli nieraz już stały się przyczyną pożaru.

Daleko łatwiej kierować charlierkami, napełnionemi wodorem lub gazem oświetlającym. Chcąc wznieść się do znaczniejszej wysokości, należy zmniejszyć ciężar balastu, składającego się zwykle z worków piasku, umieszczonych w łódce; piasek ten powinien być bardzo drobny, aby, spadając ze znacznej wysokości na ziemię, nie wyrządzał szkody. W miarę potrzeby wysypuje się ten piasek, zawsze jednak w niewielkiej tylko ilości, wyrzucenie bowiem garści piasku może już spowodować nowe znaczne wzniesienie balonu; należy także oszczędzać ten szacowny materyał i nie powinno się nigdy całkowicie go zużyć, aby zawsze zachować możność wzniesienia się w wypadku, gdy dana miejscowość na ziemi okazuje się nieodpowiednią dla zarzucenia kotwicy. Podczas podróży nadpowietrznej nieraz już się zdarzało, że aeronauci, po wyczerpaniu całego balastu, wyrzucali żywność, odzież, a nawet przyrządy naukowe, byle tylko utrzymać balon w powietrzu i uchronić go od zbyt nagłego spadku. Chcąc się spuścić,

wypada otworzyć klapę, pomieszczoną w górnej części balonu i hermetycznie zamykającą znajdujący się pod nią otwór; dokonywa się zaś to przez pociągnięcie sznurka, idącego od klapy wzdłuż balonu aż do łódki. Przez swobodny otwór, część gazu wypełniającego balon, wypływa na zewnątrz, przez co ten ostatni zaczyna opuszczać się ku dołowi (fig. 152). Spadek balonu powinien odbywać się powoli i ostrożnie; gdyby chciano odrazu ze znacznej wysokości spuścić się na ziemię, wtedy, przy wciąż wzrastającej szybkości spadku, uderzenie o ziemię byłoby tak gwałtowne, że zagrażałoby życiu aeronautów. Zbliżanie do ziemi odbywa się, dla wymienionego powodu, przerwami; opuszcza się balon na jakie 500 metrów, następnie przez wyrzucenie balastu podnosi się go na 100 metrów, znowu opuszcza i t. d., aż dopóki balon nie znajdzie się na nieznacznej odległości od powierzchni ziemi. Wtedy rzuca się specyalnego rodzaju sznur, mniej więcej 50 metrów długi, przyczepiony do łódki i zaopatrzony w mnóstwo grubych węzłów. Gdy część tego sznura leży na ziemi, ciężar balonu o tyleż się zmniejsza tak, że unosi się on jeszcze w powietrzu, dopóki dalszy wypływ gazu znowu go nie obniży; sznur ten służy więc także jako balast, który jednak zawsze w razie potrzeby napowrót można wciągnąć. W końcu zarzuca się jednę lub dwie kotwice, aby uwięzić balon.

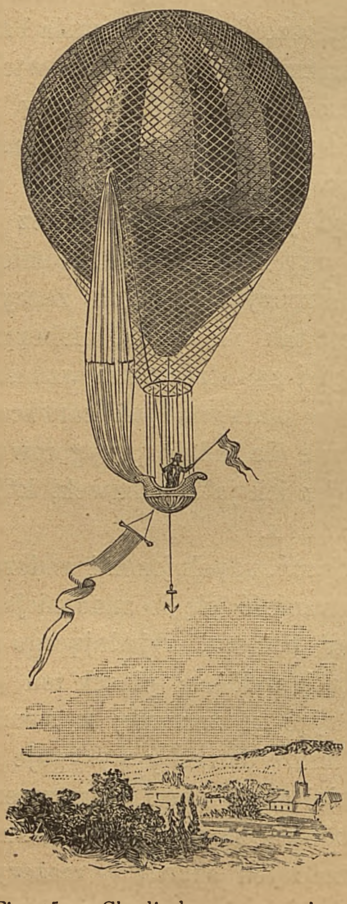


Fig. 152. Charlierka z przyczepionym do niej spadochronem.

Aeronauta sądzi o wznoszeniu lub spadaniu balonu ze wskazówek barometru: w pierwszym wypadku słup rtęci w barome-

trze spada, w drugim zaś — podnosi się; za pomocą tegoż przyrządu ocenia on wysokość, na jakiej w danej chwili się znajduje. Długa chorągiew przyczepiona do łódki, powiewając po nad tą ostatnią lub też pod nią, także pokazuje, czy balon spada czy też się wznosi (ten ostatni wypadek przedstawiony jest na fig. 152).

Wkrótce po wynalezieniu balonów, usiłowano zbudować przyrząd, za pomocą którego aeronauta, w razie niebezpieczeństwa, dotyczącego samego balonu, mógłby się uchronić od zbyt szybkiego spadku. Przez długi czas sądzono, że zadaniu temu dobrze odpowiada wynaleziony wówczas spadochron. Przyrząd ten składa się z obszernej okrągłej kapy, mającej mniej więcej 5 metrów w średnicy i zeszytej z oddzielnych pasów bardzo mocnej materyi, na wzór pokrywy parasola. Do brzegów kapy przymocowane są dokoła sznury, zbiegające się w jeden wspólny węzeł, do którego przyczepiona jest mała łódka. Na fig. 152 z lewej strony widać taki zwinięty w postaci zamkniętego parasola spadochron, którego górna część przyczepiona jest do środka balonu za pomocą sznurka, przesuniętego przez sieć sznurów balonu i zwieszającego się aż do łódki tegoż, dolna zaś — węzeł i mała łódka — umieszczone są w większej łódce balonu. W razie niebezpieczeństwa aeronauta, przecina sznurek, łączący spadochron z balonem i przechodzi do małej łódki. W tej chwili rozpoczyna się spadek i szybkość jego stałaby się wkrótce bardzo wielką, gdyby nie to, że spadochron coraz bardziej się roztwiera, przez co wzrasta także znacznie opór powietrza tak, że w końcu spada on bardzo wolno na ziemię.

Garnerin pierwszy odważył się w r. 1802 za pomocą takiego przyrządu spuścić na ziemię z wysokości około 1000 metrów. Spadochron, jakiego użył śmiały ten aeronauta, nie posiadał pośrodku otworu tak, że powietrze zgęszczane pod spadającą kapą mogło odpływać tylko z boków, przez co spadochron ulegał silnym wstrząśnieniom, które groziły Garnerin'owi poważnem niebezpieczeństwem. Brak ten łatwo daje się usunąć, jeżeli pozostawić zgęszczonemu powietrzu wolne ujście przez otwór pośrodku kapy tak, jak to pokazuje fig. 153. W nowszych czasach zupełnie zarzucono spadochrony, przekonano się bowiem, że pewność jaką

przedstawiają podczas spadku, bynajmniej nie jest większa od tej, jaka wypływa z dobrej konstrukcyi balonu i umiejętnego nim kierowania; wobec tego stanowiły one tylko niepotrzebny balast, bardziej szkodliwy, niż pożyteczny.

Nie o wiele lepszy skutek odniosły liczne usiłowania w celu wynalezienia sposobu poziomego kierowania balonami, podejmowane głównie przez aeronautów francuzkich, z których wyszczególnić należy Giffarda, Dupuy de Lôme'a, a w ostatnich latach — Krebsa i Renard'a. Brak miejsca nie pozwala nam wejść w szczegóły tych ciekawych prób, do zrozumienia których potrzebna jest gruntowniejsza znajomość praktycznej mechaniki; powiemy więc tylko, że, jak dotychczas, o właściwem poziomem kierownictwie balonami nie ma mowy i można tylko, co najwyżej, nadawać im kierunek, zbaczający nieco od kierunku panującego w danej warstwie wiatru, lecz nie więcej jak o 15°.



Fig. 153. Spadochron podczas spadku.

Cała przyszłość balonów jako środka lokomocyi zależy od mniej lub więcej skutecznego rozwiązania powyższego zadania, dotychczasowe zaś takie zastosowanie, głównie z powodu wymienionego wyżej braku, jest bardzo małe. Już w kilkanaście lat po wynalezieniu balonów, znakomity matematyk Carnot zrozumiał korzyści, jakie mogą one oddać sztuce wojennej i z jego inicyatywy w r. 1794 przyłączono do wojska francuzkiego legiony aeronautów, którzy jeszcze w czerwcu tegoż roku uczestniczyli w bitwie pod Fleurus: wzniósłszy się na znaczną wysokość uwięzionym balonem, wyśledzili oni pozycye wojska austryackiego i przez to niemało się przyczynili do wygrania bitwy przez

francuzów. Często używano uwięzionych balonów do tego samego celu podczas wojen rzeczypospolitej i Napoleona i jeszcze w r. 1814 Carnot posługiwał się tymże środkiem przy obronie Antwerpii; również często korzystano z uwięzionych balonów podczas wojny pomiędzy północnemi i południowemi Stanami Ameryki Północnej. Nieco inne zastosowanie znalazł balon w ostatniej wojnie francuzko-niemieckiej: gdy Paryż został ze wszech stron otoczony przez wojska nieprzyjacielskie i pozbawiony w ten sposób wszelkiej komunikacyi z pozostałą Francyą, wpadnięto na pomysł, aby wysyłać z miasta listy, depesze, a nawet ludzi za pomocą balonów, które puszczano naturalnie tylko wtedy, gdy wiatr wiał w stronę kraju, wolną od wojsk niemieckich. Przez cały czas oblężenia Paryża puszczono 54 balonów z $2^1/_2$ milion. listów, z których jednak nie wszystkie dotarły do pożądanego celu; niektóre, wskutek nagłej zmiany wiatru, wpadły w ręce nieprzyjaciół, inne zaś zagnane zostały aż do wnętrza Niemiec, a jeden nawet — aż do Norwegii.

Częstokroć także przedsiębrano podróże nadpowietrzne w celach czysto naukowych, które niejednym już przyczynkiem zbogaciły nasze wiadomości, dotyczące zmian, zachodzących w atmosferze. Aeronauci w takich razach zaopatrują się w odpowiednie przyrządy, jak barometry, termometry, hygrometry (te ostatnie służą do mierzenia stopnia wilgoci), przyrządy do mierzenia natężenia magnetyzmu ziemskiego, elektryczności i t. d., przez co łódka balonu przyjmuje postać małej spostrzegalni meteorologicznej. Do najciekawszych pod tym względem należą podróże, jakie odbył w r. 1804 uczony francuzki Gay-Lussac z początku wespół z Biot'em, później zaś sam. Sławny ten fizyk wzniósł się na 7016 metrów nad poziom morza; na tej wysokości barometr spadł do 320 milimetrów, termometr zaś, który na powierzchni ziemi wskazywał 31° C. wyżej zera, spadł do 9,5° C. niżej zera. Powietrze w górnych sferach było tego dnia (działo się to w lipcu) tak suche, że substancye hygroskopiczne, jak papier lub pergamin, zupełnie wysychały i skręcały się, jak gdyby były wystawione na działanie ognia. Oddech i obieg krwi były nadzwyczaj przyśpieszone z powodu znacznego rozrzedzenia powietrza; Gay-Lussac

skonstatował u siebie 120 uderzeń pulsu, podczas gdy normalnie mógł ich naliczyć tylko 66.

Podczas pierwszej podróży, odbytej wspólnie z Biot'em, uczeni ci zmierzyli natężenie magnetyzmu ziemskiego w różnych odległościach od powierzchni ziemi, podczas drugiej zaś Gay-Lussac zebrał powietrze na wysokości przeszło 7000 metrów i poddawszy je następnie analizie, otrzymał nader ważny dla nauki rezultat, że i na tej wysokości skład powietrza, pod względem jego zawartości azotu i tlenu, jest ten sam co i na powierzchni ziemi.

Ciekawe są także podróże, odbyte przez Barrala i Bixio w r. 1850, oraz przez Glaishera i Coxwella, pomiędzy 1862 a 1865 r., przedsiębrane na zlecenie Brytańskiego Towarzystwa postępu nauk. Podczas jednej z podróży, ci ostatni aeronauci napotkali, a było to w lipcu, na chmurę prawie 4 kilometry grubą, utworzoną całkowicie z drobnych igieł lodu i gdy dotarli do wysokości 7050 metrów, temperatura spadła do 39° C. niżej zera tak, że rtęć w barometrach i termometrach zaczynała zamarzać.

Nadmieniliśmy już przedtem, że podróże nadpowietrzne nie zawsze mają szczęśliwy przebieg: tak niedalej jak w 1875 r. dwóch aeronautów Crocé-Spinelli i Sivel na wysokości 8600 metrów znalazło śmierć przez uduszenie, pomimo przedsiębranych ostrożności i tylko trzeci uczestnik wyprawy—Tissandier—ocalał.

Gdyby się kiedykolwiek udało wynaleźć sposób utrzymywania uwięzionych balonów przez dłuższy czas na tej samej wysokości, wtedy możnaby poustawiać w nich samozapisujące przyrządy meteorologiczne (o których będzie mowa w końcu niniejszego dzieła) i w ten sposób otrzymywać systematyczny szereg obserwacyj. Teraz zaś musimy się zadawalniać pojedyńczemi spostrzeżeniami, dokonywanemi podczas jednej podróży, trwającej zwykle przez stosunkowo krótki przeciąg czasu. Od urzeczywistnienia powyższej myśli, jesteśmy atoli, jak się zdaje, jeszcze bardzo daleko.

ROZDZIAŁ XII.

Zjawiska, zachodzące przy stykaniu się gazów z ciałami stałemi, ciekłemi i lotnemi.

§ 1. Pochłanianie gazów przez ciała stałe. Błonka gazowa. Obrazy Mosera.

Jeżeli do przestrzeni, wypełnionej jakimś gazem, wprowadzamy ciało stałe, wtedy przyciąga ono najbliższe cząstki gazu, wskutek czego następuje zgęszczenie tego ostatniego na powierzchni ciała stałego i tworzy się tak zwana *błonka* zgęszczonego gazu. Im większa jest powierzchnia ciała stałego w stosunku do jego objętości, tem więcej punktów styka się z gazem i przyciąga cząstki tegoż, który przytem nietylko skupia się na powierzchni ciała stałego, lecz przenika przez pory i przestrzenie międzycząstkowe do jego wnętrza i pozostaje tam wskutek przyciągania. To ostatnie zjawisko, zwane *pochłanianiem* gazu, możemy łatwo uwidocznić za pomocą bardzo prostego doświadczenia. Jeżeli szklaną rurkę, zamkniętą u góry i dolnym otworem zanurzoną w rtęci, napełnimy kwasem węglanym i następnie do tej rurki wprowadzimy kawałek świeżo wyprażonego węgla, zobaczymy, że objętość gazu się zmniejsza i rtęć w rurce się podnosi, co dowodzi, iż gaz zostaje pochłonięty przez węgiel. Tak samo zachowują się inne ciała stałe względem różnych gazów.

Najrozleglejsze doświadczenia nad pochłanianiem gazów przez ciała stałe zawdzięczamy de Saussure'owi. Uczony ten wykazał przedewszystkiem, że do badań podobnych nadają się jedynie wyprażone i świeżo ugaszone ciała, a to dlatego, że ciała, które przez dłuższy czas leżały na powietrzu, skupiły już na swej powierzchni powietrze atmosferyczne oraz parę wodną. Saussure wprowadzał wyprażone ciała pod dzwon, w którym poprzednio zebrał nad rtęcią zmierzoną objętość danego gazu i następnie mierzył zmniejszenie objętości tegoż. Z licznych jego doświadczeń okazuje się, że jedno i to samo ciało pochłania różne gazy w rozmaitym stopniu, oraz że różne ciała pochłaniają rozmaite objęto-

ści jednego i tego samego gazu. Kawałek świeżo wyprażonego węgla drzewnego, jeżeli objętość jego przyjmiemy równą 1, pochłania 90 objętości amoniaku, 55 siarkowodoru, 35 kwasu węglanego, 9,5 tlenku węgla, 9,25 tlenu, 1,75 objętości wodoru; pianka morska pochłania 15 objętości amoniaku, 11,7 siarkowodoru, 5,3 kw. węgl., 1,1 tlenku węgla, 1,5 tlenu, 0,5 wodoru. Widzimy, że dla dwu wymienionych ciał stałych pochłonięte ilości różnych gazów następują po sobie w tym samym porządku; *w ogóle gazy tem silniej zostają pochłonięte, im łatwiej dają się skroplić pod wpływem ciśnienia*, jak tego dowodzi powyższy wykaz. Podobnie jak węgiel zachowują się wszystkie ciała, posiadające znaczną powierzchnię w stosunku do swej objętości, naprzykład ciała zproszkowane, gąbka platynowa i t. d., przyczem w stanie wilgotnym pochłaniają one z każdego gazu znacznie mniej, niż gdy są starannie wysuszone. Co się tyczy wpływu ciśnienia, pod jakiem znajduje się gaz, tyle tylko daje się powiedzieć, że wraz ze zmniejszeniem tego ciśnienia, zmniejsza się także objętość gazu, lecz nie w tym samym stosunku. Co się tyczy wpływu natury ciała pochłaniającego na ilość pochłoniętego gazu, to zdaje się wynikać z doświadczeń Quincke'go, że ilość ta wzrasta nietylko wraz z powierzchnią, lecz i z gęstością ciała stałego. Pewne względy każą nadto przypuszczać, że w zjawiskach tych obok działań czysto fizycznych odgrywają także pewną rolę wpływy chemiczne.

Z omawianej tu własności niektórych ciał korzysta się niekiedy w praktyce; tak naprzykład miałki węgiel drzewny, który najlepiej w tym celu wsypać do woreczka z rzadkiego muślinu, doskonale pochłania z otoczenia niektóre gazy, jak siarkowodór, amoniak, pewne węglowodory i t. d. zanieczyszczające powietrze i przyczynia się w ten sposób do oczyszczenia takowego. W związku także z pochłanianiem gazów znajduje się prawdopodobnie tak dziwna na pozór własność samozapalności niektórych ciał zproszkowanych, jak miałkiego węgla, które w stanie masywnym nie zapalają się przy zwykłej temperaturze, lecz czynią to dopiero przy ogrzaniu. Pochłanianie mianowicie gazów połączone jest z ich zgęszczeniem, temu zaś ostatniemu procesowi,

jak to w następstwie zobaczymy, zawsze towarzyszy wydzielanie się ciepła, które, w razie łatwej palności ciała pochłaniającego, może przyczynić się do jego zapalenia.

Istnienie błonki zgęszczonych gazów na powierzchni ciał stałych, które przez dłuższy czas były z niemi w zetknięciu, tłómaczy nam także ciekawe obrazy, powstające przez chuchanie, t. zw. obrazy Mosera. Każdy zna zjawisko tych obrazów. Gdy piszemy palcem albo lepiej drewnianą pałeczką na suchej szybie lub wypolerowanej płycie metalowej, wtedy nie znać śladów pisma; te jednak natychmiast występują, gdy chuchniemy na szybę lub płytę i jeszcze wyraźniej się uwydatniają, gdy wystawimy ją na działanie par rtęci, a to dlatego, że pary wodne lub rtęciowe inaczej się osadzają na miejscach zapisanych, niż na niezapisanych. Moser pokazał dalej, że jeżeli na jakiejkolwiek suchej płycie położymy pieczątkę z głoskami wypukłemi lub wklęsłemi, monetę, lub inne podobne przedmioty i po odjęciu ich chuchniemy na płytę lub wystawimy ją na działanie par rtęciowych, to wyraźnie wystąpi na niej obraz pieczątki lub monety i t. d. Co więcej, to samo zachodzi nawet w razie, gdy pieczątka nie dotyka bezpośrednio płyty, lecz utrzymywana jest na bardzo blizkiej od niej odległości przez podłożenie z boków cienkich blaszek miki.

Moser, który pierwszy dokładniej obserwował te zjawiska, poczytywał je błędnie za skutek utajonego światła, właściwego jakoby wszystkim ciałom. Dopiero Waidele w 1843 r. przez szereg licznych doświadczeń wykazał, że źródła tych zjawisk szukać należy w omówionej wyżej błonce gazowej, pokrywającej ciała stałe i składającej się zwykle z cienkiej warstewki mocno zgęszczonego powietrza, pary wodnej i nader delikatnego pyłu. Przez pisanie albo stawianie pieczątki na płycie, wywołujemy zmianę w jej atmosferze gazowej w punktach zetknięcia tak, że przy następnem chuchaniu pary niejednakowo się osadzają w różnych miejscach płyty. Pisząc na płycie, usuwamy właśnie ową błonkę z miejsc, których się dotykamy, gdy zaś następnie chuchamy albo wystawiamy płytę na działanie rtęci, pary zgęszczają się w tych miejscach w większej ilości, niż w miejscach niezapi-

sanych, wskutek czego pierwsze nabierają innego wyglądu, niż drugie. Waidele podał także bardzo łatwy sposób, za pomocą którego możemy dowoli pozbawiać płytę błonki gazowej, albo powlec ją świeżą atmosferą gazową. W pierwszym wypadku posypuje się płytę świeżo wyprażonym i ostudzonym w próżni tryplem (pył węglowy), który, jako silny pochłaniacz gazów, odbiera jej błonkę, następnie zaś ściera się starannie trypel kawałkiem czystej waty. W drugim wypadku przeciwnie, posypuje się świeżo wypaloną i ostudzoną w próżni płytę tryplem, który przez dłuższy czas pozostawał w zetknięciu z jakimś gazem i następnie ściera trypel jak wyżej. Jeżeli na oswobodzonej od gazów płycie postawimy pieczątkę, to w punktach zetknięcia błonka powietrzna tej ostatniej przejdzie, częściowo przynajmniej, na płytę, przez co w miejscach tych przy chuchaniu para będzie się zgęszczała słabiej, niż w innych i powstanie obraz pieczątki. Z drugiej strony, możemy tę ostatnią pozbawić atmosfery gazowej, jeżeli ją ogrzejemy, wyczyścimy szczoteczką, zwilżoną spirytusem i starannie wytrzemy. Taka świeżo oczyszczona pieczątka, będąc postawiona na płycie, pokrytej warstewką jakiegoś gazu, pozbawia ją takowej w punktach zetknięcia; w tych przeto miejscach, przy następnem chuchaniu więcej się zgęści pary, niż w innych, tak, że i w tym wypadku otrzymamy obraz pieczątki. Jeżeli natomiast obie, płyta i pieczątka, świeżo są wytarte, albo jeżeli obie opatrzone są jednakowemi błonkami gazowemi, to obraz albo nie powstaje wcale, albo też występuje bardzo słabo. Gdy zaś płyta i pieczątka przez dłuższy czas leżały na powietrzu i nie były ścierane, mają one błonki gazowe niejednakowej gęstości, (różne bowiem ciała w różnym stopniu zgęszczają gazy na swej powierzchni) w miejscach ich zetknięcia albo samego nawet zbliżenia nastąpią zmiany w gęstości ich atmosfer gazowych, wskutek czego przy następnem chuchaniu powstanie odpowiedni obraz. Doświadczenia te i inne podobne dowodzą słuszności powyższego sposobu tłómaczenia obrazów Mosera.

§ 2. Pochłanianie gazów przez ciecze.

Nietylko ciała stałe, lecz i ciecze przyciągają i mniej lub więcej silnie pochłaniają gazy. Jeżeli naprzykład szklaną rurę, zamkniętą u góry i dolnym otworem zanurzoną w rtęci, napełnimy amoniakiem i następnie wprowadzimy do niej, powyżej rtęci, nieco wody, zobaczymy, że rtęć w rurze szybko się podnosi, co dowodzi, że gaz rzeczony zostaje pochłonięty przez wodę. Jedna i ta sama ciecz, przy jednakowych warunkach temperatury i ciśnienia, pochłania rozmaite ilości różnych gazów; tak samo różne ciecze pochłaniają niejednakowe ilości jednego i tego samego gazu.

Od czasów Priestley'a, który pierwszy badał ten przedmiot, wielu fizyków i chemików zajmowało się zjawiskami pochłaniania i starało się oznaczyć ilości różnych gazów, pochłanianych przy danych warunkach temperatury i ciśnienia przez różne ciecze, oraz znaleźć stosunek, zachodzący pomiędzy ilością pochłoniętego gazu a ciśnieniem, pod jakiem on się znajduje. Doświadczenia Henry'ego, wykonane w 1803 r. wykazały, że *objętość gazu, pochłanianego przy stałej temperaturze przez daną objętość cieczy, jest niezależna od jego ciśnienia.* Tak naprzykład dana objętość wody pochłania przy temperaturze 15° C. prawie taką samą objętość kwasu węglanego, niezależnie od tego, czy gaz ten znajduje się pod ciśnieniem jednej, lub więcej atmosfer. Ponieważ zaś gęstość gazu, według prawa Boyle'a-Mariotte'a, jest wprost proporcyonalna do wywieranego nań ciśnienia, z tego więc wynika, że ilość wagowa gazu, pochłanianego przez daną objętość cieczy przy niezmiennej temperaturze jest wprost proporcyonalna do ciśnienia, pod jakiem znajduje się gaz. Znając przeto ilość wagową gazu, pochłanianego przez pewną ciecz przy danem ciśnieniu, można łatwo obliczyć ilość tegoż gazu, pochłanianą przy jakiemkolwiek innem ciśnieniu. Ilość ta, przy stałem ciśnieniu, zmniejsza się, gdy temperatura się podnosi; związek jednak, jaki zachodzi między wzrostem temperatury i zmniejszeniem ilości pochłoniętego gazu, jest bardzo zawikłany.

Z powyższego wynika, że ciecz, która została nasycona gazem przy pewnem ciśnieniu, musi częściowo go tracić, jeżeli zmniejszymy ciśnienie, jak to w istocie widzimy w szumowaniu, musowaniu niektórych gatunków wina, wody sodowej lub selcerskiej, wód mineralnych i t. d. Przy ogrzewaniu ciecze także tracą pochłonięty gaz; dla uwolnienia naprzykład wody od zawartego w niej powietrza, najlepiej jest dobrze ją przegotować. Należy jednak zauważyć, że ciecze tylko wtedy przy ogrzewaniu lub zmniejszeniu ciśnienia całkowicie tracą pochłonięty gaz, gdy nie wchodzą z nim w połączenie chemiczne; nie można naprzykład z kwasu solnego—rozczynu gazu chlorowodorowego w wodzie—przez gotowanie całkowicie wypędzić chlorowodoru.

W nowszych czasach omawianym tu przedmiotem zajmował się wiele Bunsen. Uczony ten za pomocą specyalnie w tym celu zbudowanego przyrządu—absorbcyometru—dokładnie oznaczył t. zw. *współczynniki pochłaniania* różnych gazów dla różnych cieczy, t. j. te objętości gazów, które przy 0^{0} i ciśnieniu 1 atmosfery zostają pochłonięte przez jednostki objętości danych cieczy. Litr wody przy temper. 0^{0} i ciśnieniu 1 atmosfery pochłania 727,2 litrów amoniaku, 43,6 litra kwasu siarkowego (dwutlenku siarki), 3,3 l. siarkowodoru, 1,002 l. kwasu węglanego, 0,0299 l. tlenu, 0,0179 l. powietrza atmosferycznego i t. d. Podane tutaj cyfry przedstawiają współczynniki pochłaniania wymienionych gazów dla wody; w alkoholu te same gazy rozpuszczają się w daleko większych ilościach. W ogóle gazy, łatwo dające się skroplić, silniej zostają pochłonięte przez ciecze, niż te, które trudno skroplić, przyczem jednak wpływy natury chemicznej odgrywają tu jeszcze większą rolę, niż przy pochłanianiu gazów przez ciała stałe.

Jeżeli nad cieczą znajduje się mięszanina kilku gazów, nie działających chemicznie na ciecz, to każdy z nich rozpuszcza się w niej tak, jak gdyby sam jeden wypełniał całą przestrzeń, zajmowaną przez mięszaninę. Innemi słowy, objętość jakiegoś gazu, pochłanianego przez daną ciecz, jest niezależna od tego, czy w tej samej przestrzeni ponad cieczą znajduje się jeszcze inny gaz, czy też nie. Pochłonięta zaś ilość wagowa każdego z gazów

mięszaniny jest, jak to wynika z prawa Henry'ego, wprost proporcyonalna do jego parcyalnego ciśnienia (patrz str. 171), t. j. do tej części całkowitego ciśnienia mięszaniny, która przypada na dany gaz. Przykład lepiej to wyjaśni. Litr powietrza atmosferycznego zawiera przybliżenie $^1/_5$ litra tlenu i $^4/_5$ azotu; jeżeli powietrze to wywiera ciśnienie 1 atmosfery, to $^1/_5$ tego ciśnienia przypada na tlen, $^4/_5$ zaś na azot. Woda, stykająca się z takiem powietrzem, pochłania tyle tlenu, ileby go pochłaniała, gdyby całe powietrze składało się wyłącznie z tlenu o ciśnieniu $^1/_5$ atmosfery i tyle azotu, ileby go się w niej rozpuściło, gdyby całe powietrze składało się wyłącznie z azotu o ciśnieniu $^4/_5$ atmosfery. Łatwo także obliczyć ilości wagowe tych gazów, pochłoniętych przez wodę, stykającą się z powietrzem o ciśnieniu 1 atmosfery. Litr tlenu przy 0^0 i ciśnieniu 1 atmosfery waży 1 gr. 4336, współczynnik pochłaniania tego gazu dla wody równa się 0,02989; każdy litr wody pochłonąłby tedy $1{,}4336 \times 0{,}02989$, t. j. 0,04285 gram. tlenu, gdyby gaz ten znajdował się pod ciśnieniem 1 atmosfery, ponieważ zaś parcyalne jego ciśnienie w powietrzu wynosi tylko $^1/_5$ atmosf., każdy litr wody pochłonie przeto tylko $\frac{0{,}04285}{5}$ t. j. 0,00857 gr. tlenu. W podobny sposób obliczamy, że ilość wagowa pochłoniętego azotu równa się $1{,}2544 \times 0{,}01478 \times \frac{4}{5}$ t. j. 0,0158 gram. Stosunek wagowy azotu do tlenu w powietrzu, pochłoniętem przez wodę, jest więc jak 0,0158 do 0,00857, czyli nieco większy, niż 2 do 1, podczas gdy w zwykłem powietrzu atmosferycznem stosunek ten jest nieco mniejszy, niż 4 do 1. Powietrze, rozpuszczone w wodzie—którem oddychają zwierzęta i rośliny wodne—jest tedy prawie 2 razy bogatsze w tlen, niż zwykłe powietrze atmosferyczne, co pochodzi ztąd, że tlen znacznie więcej się rozpuszcza w wodzie, niż azot (porównaj współczynniki pochłaniania tych gazów).

§ 3. Wypływ gazów. Porywanie gazu przez strumień płynu.

Jeżeli w ścianie naczynia, napełnionego gazem o jakiemkolwiek ciśnieniu, znajduje się otwór, prowadzący do przestrzeni, zawierającej ten sam gaz o mniejszem ciśnieniu albo do próżni,

wtedy gaz wypływa z otworu i to tem szybciej, im większe jest ciśnienie, pod jakiem się znajduje i im mniejsza jest prężność zewnętrznego gazu. Wskutek wielkiej ruchliwości cząstek, wspólnej dla cieczy i gazów, wypływ tych ciał musi także podlegać podobnym prawom.

Prędkość wypływu cieczy, jak już wiemy, jest wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z wysokości jej poziomu nad otworem (patrz str. 135), t. j. z wysokości słupa cieczy, który cisnąc na cząstki, znajdujące się przed otworem, powoduje ich wypływ. Miarę ciśnienia gazu daje nam wysokość słupa rtęci, równoważonego przez ten gaz, możemy atoli ciśnienie to wyrazić także w wysokości słupa jakiegokolwiek innego ciała, naprzykład gazu, mającego tę samą gęstość, co i dane ciało lotne; wysokość takiego słupa będzie jednak tyle razy większa od wysokości słupa rtęci, ile razy gaz jest lżejszy od tej cieczy. Otóż *prędkość wypływu gazu do próżni jest wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z ciśnienia, wyrażonego za pomocą wysokości słupa ciała lotnego, mającego tę samą gęstość, co i wypływający gaz.* Jeżeli naprzykład w naczyniu znajduje się powietrze o ciśnieniu 1 atmosfery, ciśnienie to mierzy się za pomocą słupa rtęci, wysokości 760 milimetr., a więc za pomocą słupa powietrza, mającego 760×10500 milim., czyli 7980 metrów wysokości, ponieważ powietrze o zwykłej gęstości jest 10500 razy lżejsze od rtęci. Oprócz tego prędkość wypływu gazu jest także wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z podwójnego natężenia siły ciężkości w danem miejscu, t. j. z 2 g, albo przyjmując $g = 10$, z 20. W ten sposób obliczona prędkość wypływu powietrza o ciśnieniu 1 atmosfery do próżni wynosi 396 metrów. Lecz taką prędkość powietrze posiada tylko w pierwszej chwili wypływu, wkrótce bowiem w próżni znajduje się już pewna ilość powietrza, które wywiera ciśnienie wprost przeciwne i ciągle wzrastające, wskutek czego prędkość wypływu staje się coraz mniejsza i nakoniec, przy ciśnieniu równem z obu stron otworu, staje się równa zeru. Właściwie więc w każdej chwili prędkość wypływu jest wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z różnicy wysokości słupów powietrza, wyrażających wielkość ciśnienia wewnątrz i zewnątrz naczynia.

Jeżeli zamiast powietrza weźmiemy inny, lżejszy od niego gaz, lecz przy tem samem ciśnieniu, wtedy wysokość słupa, dającego miarę tego ciśnienia, będzie tyle razy większa od wysokości słupa powietrza, ile razy dany gaz jest odeń lżejszy. Innemi słowy wysokość ta jest odwrotnie proporcyonalna do gęstości gazu; dla wodoru naprzykład o ciśnieniu 1 atmosfery równa się ona $7980 \times 14,5$ czyli 115710 metrów, wodór bowiem jest 14,5 razy lżejszy od powietrza, przy jednakowych warunkach temperatury i ciśnienia. W ten sposób z powyższego prawa wynika, że *prędkości wypływu różnych gazów, znajdujących się pod jednakowem ciśnieniem, są w stosunku odwrotnym do pierwiastków kwadratowych z ich gęstości.* Gęstości naprzykład tlenu i wodoru mają się do siebie jak 16 do 1, pierwiastki kwadr. tych liczb są 4 i 1, otóż wodór wypływa, przy jednakowych warunkach ciśnienia, 4 razy prędzej, niż tlen. Znając stosunek gęstości dwóch gazów, możemy, na mocy ostatniego twierdzenia, obliczyć stosunek prędkości ich wypływu i naodwrót: ze znanych prędkości wypływu dwóch gazów możemy obrachować ich gęstości. Na tej ostatniej zasadzie polega bardzo ciekawa metoda Bunsena, służąca do oznaczenia gęstości gazów i par.

Omówione powyżej prawa stosują się tylko do wypływu gazów przez otwór w cienkiej ścianie albo przez rurki, których średnica jest dosyć znaczna w stosunku do ich długości. Jeżeli natomiast gazy wypływają przez włoskowate rurki, wtedy prędkości wypływu, jak to wykazały rozległe doświadczenia Grahama, stają się mniejsze, co dowodzi, że i u gazów, podobnie jak u cieczy, ma miejsce tarcie jednych warstw gazu o inne i o ścianki rurek, przez które gazy wypływają. Wypływ gazu przez włoskowate kanały zatyczki gipsowej zbadał ponownie 30 lat temu Bunsen. Znalazł on, pomiędzy innemi, że prędkości wypływu różnych gazów przy jednakowem ciśnieniu nie znajdują się do siebie wtedy w odwrotnym stosunku pierwiastków kwadratowych z ich gęstości. Tak naprzykład prędkości wypływu tlenu i wodoru w rzeczonych warunkach mają się do siebie jak 1 do 2,73, podczas gdy odwrotny stosunek pierwiastków kwadratowych z gęstości tych gazów jest jak 1 do 4.

Z tego wynika, że przepływ gazów przez gipsową przegrodę zostaje zwolniony wskutek tarcia, którego wielkość zależy od natury gazu, że więc puste przestrzenie gipsu zachowują się względem przepływającego przez nie gazu nie jak system otworów w cienkiej ścianie (wtedy bowiem prędkości wypływu różnych gazów musiałyby być odwrotnie proporcyonalne do pierwiastków kwadratowych z ich gęstości), lecz jak system włoskowatych kanałów. To samo dotyczy innych dziurkowatych przegród o wązkich porach.

Jeżeli strumień płynu—cieczy lub gazu—szybko przepływa przez powietrze, wtedy porywa z sobą przylegające dokoła cząstki tego ostatniego; do rozrzedzonej w ten sposób przestrzeni wpływa nowe powietrze, wchodzi w zetknięcie ze strumieniem i zostaje przezeń porwane i t. d. Tak samo zachowuje się względem s z y b k o przepływającego strumienia płynu każdy inny gaz. Na tej zasadzie polega pompa pneumatyczna Sprengla, o której napomknęliśmy na str. 185. Składa się ona z długiej na 1 metr i ustawianej pionowo rurki szklanej, do górnej części której przylutowana jest boczna rurka, prowadząca do naczynia, z którego chcemy wyciągnąć powietrze albo inny gaz. Jeżeli przez pionową rurkę przepływa rtęć, wtedy porywa ona z sobą gaz, znajdujący się w bocznej rurce i w połączonem z nią naczyniu; gaz ten wypływa wraz z rtęcią przez dolny otwór pionowej rurki, zanurzony również w rtęci. Na tej samej zasadzie polega także powszechnie używany przyrząd, zwany *pulweryzatorem*. Składa się on z dwóch rurek, nachylonych ku

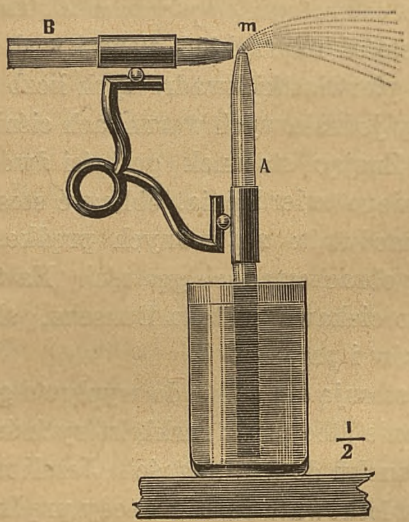


Fig. 154. Pulweryzator.

sobie pod kątem prostym, z których jedna zanurzona jest w cieczy (fig. 154). Jeżeli dmuchamy przez poziomą rurkę, to przepływający przez nią strumień gazu porywa z sobą powietrze z pionowej rurki; wskutek powstającego przez to rozrzedzenia ciecz podnosi się w tej rurze aż do górnego jej końca, gdzie przez napływający nowy strumień powietrza zostaje rozpryśnięta na wszystkie strony w postaci nadzwyczaj drobnych kropel. Podobne przyrządy służą do wstrzykiwania wody do kotła za pomocą strumienia pary (injektor Giffarda), do rozpryskiwania cieklego paliwa, naprzykład nafty, przez co ta dokładniej się męsza z powietrzem, lepiej się spala i daje więcej ciepła i t. d.

§ 4. Dyffuzya gazów.

Mówiąc o wypływie ciał lotnych, przyjmowaliśmy, że dany gaz wpływa do przestrzeni próżnej albo napełnionej tym samym gazem. Widzieliśmy, że przy ciśnieniu jednakowem z obu stron otworu (t. j. wewnątrz i zewnątrz naczynia) prędkość wypływu jest równa zeru. Rzecz się zmienia, gdy w komunikujących ze sobą przez otwór przestrzeniach znajdują się różne gazy: wtedy następuje po upływie pewnego czasu dokładne zmięszanie się obu gazów.

Różne gazy, pozostające ze sobą w zetknięciu, nie oddzielają się od siebie, jak naprzykład woda i oliwa, lecz, wskutek swej rozprężliwości, przenikają się wzajemnie, jak woda i alkohol, tworząc po upływie mniej lub więcej krótkiego czasu jednostajną mięszaninę gazów. Zjawisko to mięszania się z sobą różnych ciał lotnych wbrew działaniu ciężkości, zwane *dyffuzyą* gazów, po raz pierwszy zostało zbadane w roku 1802 przez sławnego uczonego angielskiego Daltona. Użył on do tego dwóch balonów o jednakowej objętości, zaopatrzonych w metalowe oprawy z kranami i dających się przyszrubowywać jeden do drugiego. Jeden balon napełnił on kwasem węglanym, drugi zaś powietrzem przy tej samej temperaturze i ciśnieniu i umieścił ten ostatni nad pierwszym (fig. 155, str. 220). Przy takiem urządzeniu nie mogło nastąpić zmięszanie się gazów wskutek ich ró-

żnych ciężarów właściwych, cięższy bowiem kwas węglany znajdował się pod lżejszem odeń powietrzem. Po otworzeniu kranów i ustaleniu swobodnej komunikacyi między obu gazami, ciśnienie wewnątrz balonów pozostało niezmienione, oba jednak gazy po kilku godzinach jednostajnie się rozprzestrzeniły w obu balonach wbrew działaniu ciężkości ([1]). Z tego wynika, że każdy z gazów jednostajnie wypełnił całą przestrzeń obu balonów tak, jak gdyby się znajdował w niej sam jeden. Objętość każdego gazu przytem się podwoiła, ciśnienie więc jego musiało się, według prawa Boyle'a-Mariotte'a, dwa razy zmniejszyć. Fakt przeto, że pomimo to wewnętrzne ciśnienie w obu balonach po otworzeniu kranów się nie zmienia, potwierdza omówione na str. 171 prawo Daltona, według którego ciśnienie mięszaniny gazów równa się sumie oddzielnych ciśnień, jakieby wywierały one, gdyby same jedne zajmowały całą przestrzeń, zajętą przez mięszaninę, albo innemi słowy równa się sumie ich ciśnień *parcyalnych*.

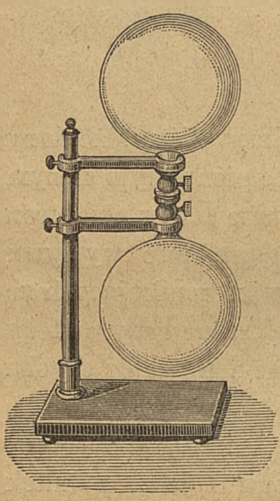


Fig. 155. Dyffuzya gazów.

Tak samo jak kwas węglany i powietrze, zachowują się także inne gazy, jeżeli nie zachodzą pomiędzy niemi reakcye chemiczne.

W r. 1834 Graham dokładniej zbadał zjawiska dyffuzyi gazów i odkrył zasadnicze prawo tych zjawisk, według którego *prędkości dyffuzyi, a więc i objętości dyffundujących w jednym i tym samym czasie gazów, są przy jednakowych warunkach ciśnienia odwrotnie proporcyonalne do pierwiastków kwadratowych z ich gęstości.* Prędkości więc dyffuzyi różnych gazów są te same, co i prędkości ich wypływu przez otwory w cienkich ścianach (patrz wyżej str. 217). Gaz, 4, 9, 16 razy lżejszy od innego, dyfunduje 2, 3, 4 razy prędzej od niego; gęstości naprzy-

---

([1]) Niektórzy sławne to doświadczenie przypisują Berthollet'owi.

kład tlenu i wodoru mają się do siebie jak 16 do 1, pierwiastki kwad. tych liczb są 4 i 1, otóż wodór przy jednakowych warunkach dyfunduje 4 razy prędzej, niż tlen. Powyższe prawo Graham wyprowadził z doświadczeń, w których gazy nie stykały się z sobą bezpośrednio, lecz były oddzielone za pomocą sztucznych przegród gipsowych. W takich jednak warunkach prawo to, jak później wykazał Bunsen, nie jest ścisłe, lecz tylko przybliżenie prawdziwe, ponieważ wtedy prędkość dyffuzyi się zmniejsza wskutek działania włoskowatości dziurkowatego gipsu (patrz badania Bunsena nad wypływem gazów przez włoskowate rurki, str. 217).

Wodór, jako najlżejszy ze wszystkich gazów, posiada też, zgodnie z powyższem prawem, największą zdolność dyffundowania i nader łatwo przenika przez powłoki, jeżeli te są tak dziurkowate, że nie przeszkadzają przenikaniu gazu; ztąd to pochodzą trudności przy napełnianiu balonów wodorem. Dzięki dyffuzyi gazów, atmosfera nasza, stanowiąca, jak już wiemy, mięszaninę głównie azotu i tlenu, posiada wszędzie ten sam skład procentowy obu składników. W największych głębokościach, jako też na najbardziej wyniosłych miejscach, [1] w napełnionych salach i w najbardziej przewietrzanych przestrzeniach, powietrze zawiera na 79 objętości azotu 21 obj. tlenu. Dzięki tejże własności ciał lotnych, kwas węglany, wydychany przez zwierzęta, przechodzi do roślin, uwalniany zaś przez te ostatnie tlen przechodzi napowrót do powietrza, które wskutek tego zawsze zawiera tylko nieznaczną ilość kwasu węglanego. W ogóle dyffuzya gazów znakomicie się przyczynia do podtrzymywania czystości powietrza w wolnej atmosferze i w naszych mieszkaniach, rozpraszając daleko dokoła gazy, szkodliwe dla życia organizmów.

Musimy się w tem miejscu zadowolnić powyższym krótkim opisem zjawisk dyffuzyi, obszerniej i głębiej rzecz tę traktować możemy dopiero w nauce o cieple.

(¹) Patrz naukowe wyniki podróży nadpowietrznej Gay-Lussac'a, str. 208.

Mięszanie się z sobą różnych gazów następuje nietylko wtedy, gdy te bezpośrednio się z sobą stykają lub komunikują przez szeroki otwór, lecz także wtedy, gdy oddzielone są za pomocą dziurkowatych przegród, jak tabliczki gipsowe, błony roślinne lub zwierzęce i t. d. Takie mięszanie się ciał lotnych poprzez przegrody nazywamy *osmozą gazów*, analogicznie do osmozy cieczy. Wodług doświadczeń Grahama i Bunsena, dotyczących tego przedmiotu, prędkości przenikania gazów przez takie przegrody są, przy jednakowych warunkach ciśnienia, prawie te same, co i prędkości ich wpływu przez włoskowate rurki, mniejsze zaś od prędkości wypływu przez otwory w cienkiej ścianie. Przytem jednak wielki wpływ wywiera także rodzaj przegrody, zarówno jak i natura przenikających gazów. Prawdopodobnie zachodzi tu z początku pochłanianie gazu przez oddzielającą ścianę, następnie zaś ulatnianie jego po drugiej jej stronie.

Osmoza gazów w połączeniu z ich rozpuszczalnością w cieczach odgrywa nader ważną rolę w procesie oddychania u zwierząt. Tlen atmosferyczny wprowadzony do płuc przy wdychaniu rozpuszcza się w śluzie, pokrywającym błonę płuc; pomiędzy śluzem tym, nasyconym tlenem, a krwią, krążącą w płucnych naczyniach krwionośnych i zawierającą kwas węglany, odbywa się proces, dzięki któremu powstają dwa przeciwne prądy: jeden przenosi tlen do krwi, drugi—sprowadza kwas węglany na powierzchnię błony płucnej.

KSIĘGA DRUGA.

D Ź W I Ę K.

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

CENA 20 KOP.

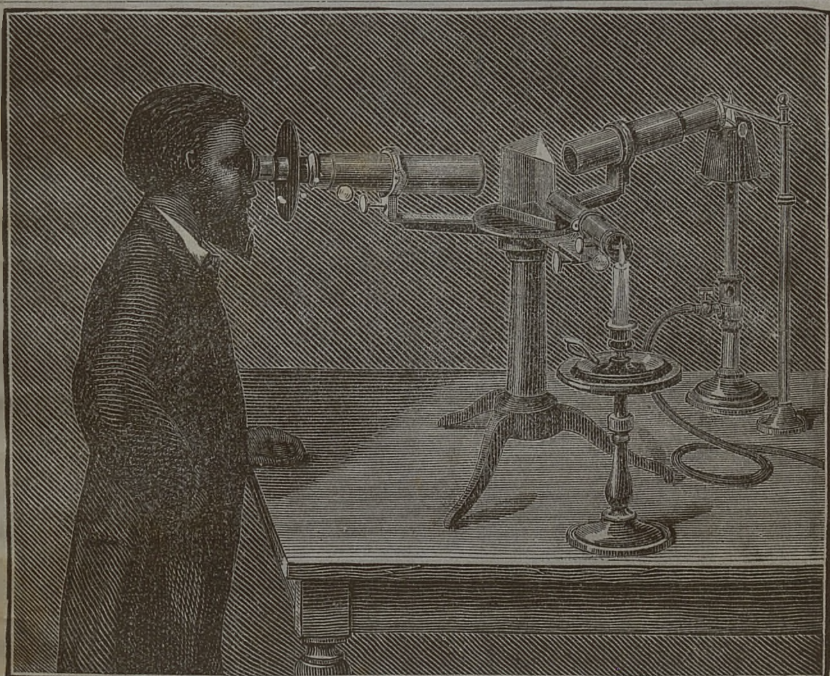
Zeszyt 8.

CENA 20 KOP.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

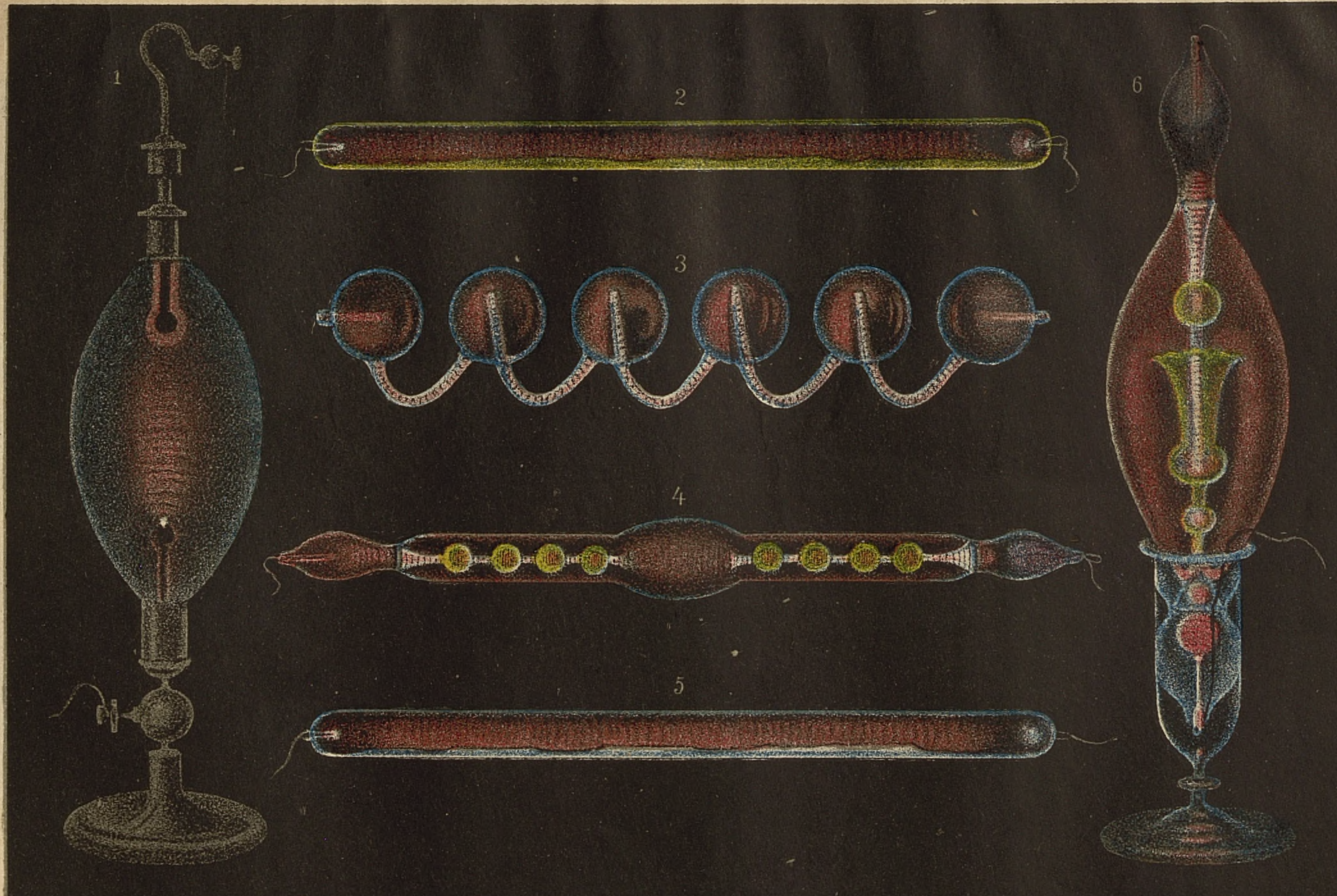
Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.



w lit. „Zofija" B. A. Bukaty

VIII. Światło elektryczne w rozrzedzonych gazach.

1. Prążkowane światło w parach alkoholu. 2. Fosforescencyja siarku wapnia. 3. Prążkowane światło w rurce Geisslera. 4. Fluorescencyja szkła uranowego. 5. Fosforescencyja siarku strontu. 6. Fluorescencyja szkła uranowego i siarczanu chininy.

ROZDZIAŁ I.

Powstawanie i rozprzestrzenianie się dźwięku.

§ 1. Zjawiska dźwięku w przyrodzie.

Brak wszelkiego dźwięku, wszelkiego szmeru, jednem słowem absolutne milczenie jest dla nas jednoznaczne z nieruchomością i martwotą. Jesteśmy tak przyzwyczajeni słyszeć jakikolwiek dźwięk, chociażby to był tylko szmer, spowodowany przez nas samych, że zaledwie możemy sobie wyobrazić świat zupełnie milczący i głuchy, jakim naprzykład ma być, według zdania astronomów, księżyc.

Na ziemi nie upływa ani jedna chwila bez dźwięku, jakkolwiek zachodzi pod tym względem znaczna różnica pomiędzy wielkiemi miastami z ich ogłuszającym szumem, a samotnością pól, równin i gór, gdzie uszu naszych dochodzi tylko cichy, przytłumiony szmer. Jakżeż różną dalej jest cisza, panująca na szczytach alpejskich lub w okolicach podbiegunowych, od szumu wzburzonego morza! Tam milczenie bywa przerywane tylko przez odgłos staczających się lawin lub pękającego lodu, a niekiedy także przez poświst wiatru. Grzmoty tak donośnie rozlegające się na równinie lub w dolinach, prawie nie istnieją na

15

najwyższych szczytach; zamiast okropnego, długotrwałego huku, cechującego te zjawiska, mamy tam tylko urwany dźwięk, podobny do tego, jaki słyszymy przy wystrzale z broni palnej. Przeciwnie, na morzu ogłusza nas bezustanny szum fal, rozbijających się o skały i przytłumiony nieco, jednostajny dźwięk, który, na podobieństwo uroczystego basa, akompaniuje ostrzejszym dźwiękom, powstającym przy uderzaniu fal o piasek lub kamienie. Zupełnie odmienne znowu wrażenie odbieramy, znajdując się na polu lub w lesie: Szelest liści, poruszanych przez wiatr, brzęk różnych owadów, głosy ptaków, dźwięk, wydawany przez gałęzie drzew pod działaniem lekkiego wiatru i tysiące innych, zaledwie uchwycić się dających szmerów—wszystko to składa się na łagodną harmonię, niekiedy wesołą, czasami zaś smutną, lecz zawsze różną od nieharmonijnego zgiełku, jakiego pełne są ulice wielkich miast.

Rzeki, strumienie i potoki dodają swe swoiste dźwięki do tego ogólnego koncertu przyrody, a w okolicach górskich dołącza się niekiedy szmer kaskady łagodnie spadających wód, a czasami także straszny łoskot obrywających się skał.

Najgłośniejsze jednak i najbardziej długotrwałe dźwięki naturalne powstają wtedy, gdy wielkie masy powietrza zostają wprawione w gwałtowny ruch, jak to się dzieje naprzykład podczas huraganów: masy te, pędząc w szalonym biegu, uderzają o napotykane przeszkody—nierówności gruntu, góry, skały, budowle lub drzewa, albo też przeciskają się pomiędzy niemi z niepohamowaną siłą. Działanie to jeszcze bardziej się potęguje, gdy towarzyszy mu wyładowanie elektryczności, manifestujące się hukiem grzmotów, wobec których milkną wszelkie inne głosy przyrody. Nieliczne tylko zjawiska są połączone z jeszcze donośniejszym dźwiękiem: tu należą wybuchy wulkanów i trzęsienia ziemi. Przed gwałtowną katastrofą, która 4 lutego 1797 r. zniszczyła Riobambę, słyszano olbrzymi huk podziemny w miastach Quito i Ibarra, którego dziwnym sposobem nie zauważono wcale w Taçunga i Hambato—punktach, leżących o wiele bliżej miejsca katastrofy. Tak samo wzniesienie się wulkanu Jorullo, dnia 28 września 1759 r. zpośród równiny, było poprzedzone

już na dwa miesiące przedtem przez długotrwały huk podziemny.

Dla uzupełnienia opisu dźwięków, wydawanych przez przyrodę bez udziału istot żyjących, wspomnijmy jeszcze o detonacyach, towarzyszących spadkowi meteorów, aerolitów i bolidów. Eksplozye te, zachodzące na znacznej wysokości, są jednakowoż słyszane na wielkiej odległości od miejsca spadku, a odnośne dźwięki bywają porównywane przez świadków owych zadziwiających zjawisk bądź do salwy armatniej, bądź do przeciągłego rozlegania się grzmotów.

Zpomiędzy wszystkich jednak dźwięków najciekawszemi dla nas są te, które wydają człowiek i zwierzęta za pomocą oddzielnych narządów, a mianowicie głos ludzki—ten niezbędny tłómacz naszych myśli i uczuć, oraz głosy zwierząt, wyrażających w grubszy nieco sposób swe radości i żale. Dalej najpotężniejsza prawie ze sztuk pięknych—muzyka, wydoskonalona przez człowieka z zaczątkowych darów naturalnych, dozwala mu uzewnętrzniać owe subtelne uczucia, których mowa ludzka nie jest w stanie wyrazić. Sztuce tej służą liczne instrumenty muzyczne, które później poznamy; jakkolwiek od czasu ich wprowadzenia człowiek coraz bardziej zbogaca zasób i brzmienia dźwięków, pozwalających mu uzewnętrzniać wzruszenia duszy, to jednak najszlachetniejszy instrument muzyczny posiada on we własnym swym organie głosowym.

I przemysłowa działalność człowieka zdradza się różnorodnemi dźwiękami, nie bardzo wprawdzie melodyjnemi, wyraziście jednak znamionującemi różne rodzaje pracy. Turkot kół, zgrzyt pił, świst lokomotyw, nieustające częstokroć dniem i nocą, nie sprawiają nam wprawdzie zazwyczaj wielkiej rozkoszy, ale nie jestże ta „muzyka przemysłu“ dla człowieka myślącego o wiele przyjemniejszą od huku dział i strzelb na polu wojny, nie zdradzaż ona wyników pracy i nauki, donioślejszych i niezrównanie szlachetniejszych od zdobyczy brutalnej siły?

Jakkolwiek różnorodnemi są wyszczególnione wyżej dźwięki, to jednak wszystkie one dają się sprowadzić do pewnego rodzaju ruchu, którego naturę i prawa rozważymy właśnie w tej księdze.

Rozpoczynamy zaś od opisu różnych sposobów powstawania dźwięku i rozchodzenia się jego w ciałach stałych, ciekłych i gazowych.

§ 2. Różne sposoby powstawania dźwięku.

Przy spotkaniu się dwóch ciał stałych zwykle powstaje, wskutek ich uderzenia o siebie, dźwięk. Tak naprzykład słyszymy uderzenie młota o kowadło,—języczka o dzwon,—pałeczek drewnianych o błonę bębna i t. d. Przy przewracaniu młota wodnego—t. j. szklanej rury, częściowo wypełnionej wodą, po nad którą znajduje się próżnia—słyszymy dźwięk, wywołany przez uderzenie wody o dno rury; tak samo przy nachylaniu barometru rtęć, uderzając o rurę, wydaje swoisty dźwięk.

Z kolei jako jeden ze sposobów wytwarzania dźwięku, wymienimy tarcie: naprzykład wyprężone struny, dzwon, płyty szklane lub metalowe, potarte smyczkiem, który dla zwiększenia tarcia pociąga się pewną żywicą, t. z. kalafonią—wydają pewne *tony*. Tak nazywamy dźwięki, odznaczające się prawidłowością i sprawiające mniej lub więcej przyjemne wrażenie. Ale tarcie może spowodować także bardzo nieprawidłowy i nieprzyjemny dźwięk, naprzykład gdy przesuwamy krzesło, gdy piszemy ostrym jakimś przedmiotem na tablicy, lub wreszcie gdy naciągamy hamulec na koło wozu i t. d. Koła jadących wozów wydają niemiły dźwięk po części wskutek tarcia, po części zaś wskutek uderzania o kamienie. Tak samo działają obie przyczyny, t. j. tarcie i uderzanie przy tych instrumentach muzycznych, których struny poruszamy palcem albo oddzielnym przyrządem; tu należą: lira, arfa, cytra, gitara; w pianinie zaś działa tylko uderzenie młotka o strunę. I przy spotkaniu się ciał ciekłych powstaje, wskutek uderzenia lub tarcia, dźwięk, jak naprzykład przy spadaniu kropel deszczu na powierzchnię stawu lub rzeki, lub przy poruszaniu się mas wodnych, wzdymanych przez wiatr i t. d. Nareszcie i ciała gazowe mogą wydawać dźwięki, jeżeli naprzemian szybko się zgęszczają i rozszerzają, jak to później szerzej wyłuszczymy; ruchy takie mogą także być

wywoływane przez uderzenie lub tarcie. Poruszając szybko w powietrzu spicrutą lub batem, słyszymy świst lub trzask; wielkie masy poruszającego się powietrza wytwarzają potężne dźwięki, gdy zmuszone są przeciskać się pomiędzy gałęziami drzew, albo szczelinami murów, albo wreszcie gdy uderzają z wielką mocą o stałe przeszkody. Jęczenie wiatru w kominie pochodzi od szczególnych ruchów powietrza, które bliżej poznamy, gdy w następstwie rozważymy ruchy gazów w rurach, to jest gdy rozpatrzymy procesy, zachodzące w instrumentach dętych, należących do tej samej kategoryi, co i narządy głosowe człowieka i zwierząt. Huk przy wybuchach, szum przy wyładowaniach elektryczności, grzmot i podobne zjawiska dźwiękowe bywają powodowane przez nagłe zmiany objętości—przez rozszerzanie się i kurczenie mas gazowych.

Jeden z najbardziej zadziwiających sposobów wytwarzania dźwięku polega na stykaniu z sobą dwóch metali o różnej temperaturze; zjawisko podobne po raz pierwszy zauważył w r. 1805 Schwartz, inspektor jednej z kopalni saskich. Mianowicie gdy położył on gorącą jeszcze sztabę srebrną na zimnem żelaznem kowadle, usłyszał nagle ostry ton, który trwał tak długo, dopóki sztaba nie oziębiła się do dosyć nizkiej temperatury. To samo spostrzeżenie przy podobnej okoliczności przypadkowo zrobił w r. 1829 Artur Trevelyan; wynalazł on różne przyrządy do uwidocznienia przyczyny powstawania dźwięku w takich wypadkach, przyrządy—które poznamy, gdy będzie mowa o drganiach dźwiękowych.

Wymienimy tutaj jeszcze szczególny dźwięk, powstający przy pewnym procesie magnetycznym: gdy pręt z miękkiego żelaza zawieszamy w ten sposób, że dolny jego koniec znajduje się we wnętrzu cewki indukcyjnej, wtedy słyszymy szczególny trzask w chwili, gdy prąd elektryczny wstępuje do zwojów cewki, a więc w chwili, gdy żelazo zaczyna się magnetyzować.

Nareszcie możemy wywołać dosyć muzykalne tony, spalając różne gazy we wnętrzu rur. Jeżeli jakiś palny gaz, najlepiej wodór, wypływa z wązkiej rurki, to po zapaleniu go i otoczeniu płomienia dostatecznie szeroką, z obu stron otwartą rurą szklaną

(fig. 156), słyszymy przeciągły ton, zmieniający się wraz z długością, szerokością, grubością ścianek i materyałem rury. Jeżeli ustawimy obok siebie kilka takich przyrządów z rurami o różnych przecięciach i długościach, otrzymamy cały szereg tonów muzykalnych; ztąd pochodzi nazwa „harmoniki chemicznej,“ nadawana takiemu przyrządowi. Badanie tych zjawisk doprowadziło Schaffgotscha i Tyndalla do odkrycia t. z. „śpiewających płomieni“—długich płomieni gazowych, rytmicznie drgających, gdy w blizkości ich wywołujemy pewne dźwięki.

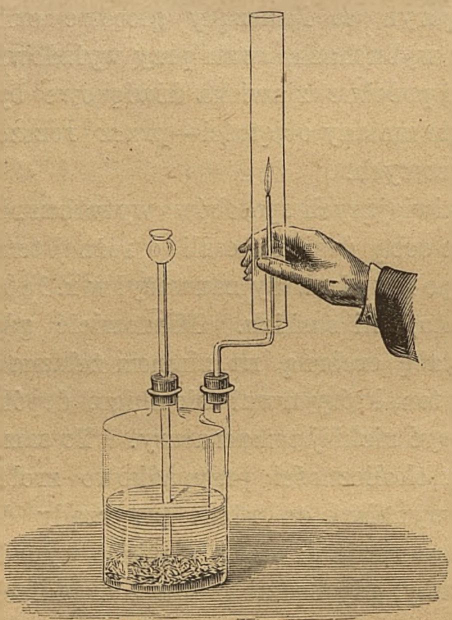


Fig. 156. Harmonika chemiczna.

Rozważyliśmy tedy powstawanie dźwięku w samych ciałach dźwięczących, stałych, ciekłych lub gazowych; pozostaje nam jeszcze zbadać, jaką drogą dźwięk od ciała dźwięczącego, naprzykład od uderzanego dzwonu, dochodzi naszych uszu. Możemy się o tem dowiedzieć za pomocą obserwacyi i bardzo prostych doświadczeń, zanim jeszcze poznamy właściwą naturę zjawisk dźwiękowych.

§ 3. Rozchodzenie się dźwięku w ciałach stałych, ciekłych i gazowych.

Jestto powszechnie znany fakt, że dźwięk wymaga pewnego dostrzegalnego czasu dla dojścia od ciala dźwięczącego do naszego organu słuchu: Jeżeli na pewnej od nas odległości kowal naprzykład uderza młotem o kowadło, wtedy pierwej spostrzegamy spadający młot, zanim odbieramy wrażenie dźwięku; podobnie wcześniej spostrzegamy dym, buchający z komina zbliżającej

się lokomotywy, niż słyszymy świstawkę; ogień, towarzyszący wystrzałowi z broni palnej obserwujemy wcześniej, niż sam wystrzał i t. d. i to tem wcześniej, im bardziej oddalonem jest ciało dźwięczące. Odstęp czasu, obserwowany w podobnych wypadkach, stanowi, ściśle biorąc, tylko różnicę pomiędzy czasem, wymaganym przez dźwięk na przebieżenie przestrzeni, oddzielającej od nas ciało dźwięczące, a czasem, którego potrzebuje światło na odbycie tej samej drogi. Ponieważ szybkość rozprzestrzeniania się światła jest, jak w następstwie zobaczymy, prawie milion razy większa od szybkości rozchodzenia się dźwięku, możemy więc czas, jakiego wymaga światło dla przebieżenia nawet znacznych odległości na ziemi, zupełnie pominąć i obserwowaną różnicę uważać za czas, w którym dźwięk przebiega odnośną przestrzeń.

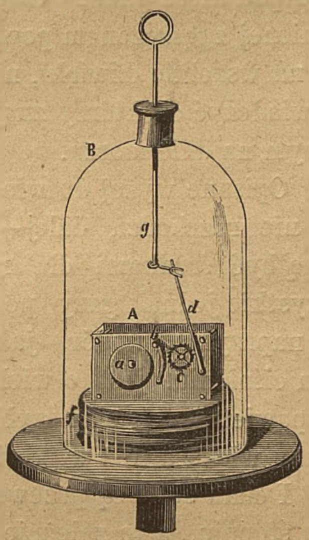


Fig. 157. Dźwięk nie rozchodzi się w próżni.

W następnym § zobaczymy, jak wielką jest prędkość dźwięku w różnych materyalnych środkach, oraz poznamy sposoby, za pomocą których określamy tę szybkość, tutaj zaś zbadamy tylko kwestyę, czy w ogóle do rozchodzenia się dźwięku koniecznym jest jakikolwiek materyalny środek, czy też dźwięk może także od ciała dźwięczącego przechodzić do nas przez próżnię. Na pytanie to odpowie nam bardzo proste doświadczenie:

Umieśćmy pod kloszem maszyny pneumatycznej mechanizm zegarkowy (fig. 157), tak urządzony, że młotek jego możemy dowoli zatrzymywać albo poruszać za pomocą części pręta *g*, wystającej z klosza. Przed wyciągnięciem powietrza z pod klosza, słyszymy wyraźnie dźwięk z powodu uderzania młotka; w miarę jednak rozrzedzania powietrza, dokonywanego w przestrzeni pod kloszem przy pomocy maszyny pneumatycznej, natężenie

dźwięku coraz bardziej się zmniejsza i nareszcie, przy możliwie zupełnej próżni, widzimy jeszcze poruszenia młotka, lecz nic już nie słyszymy. Przy powyższem doświadczeniu mechanizm zegarowy powinien spoczywać nie na samym talerzu maszyny pneumatycznej, lecz na podkładce z korka, waty lub innej jakiejś miękkiej i nieelastycznej materyi. Jeżeli teraz wprowadzimy pod klosz—zamiast powietrza, jak to było przed rozpoczęciem doświadczenia—inny gaz, naprzykład wodór, kwas węglany, tlen, pary eteru siarczanego i t. d., wtedy znowu usłyszymy dźwięk i to tem wyraźniej, im większą będzie ilość wprowadzonego pod klosz gazu. Gdy znajdujemy się w przestrzeni, wypełnionej zgęszczonem powietrzem, ucho nasze jest o wiele czulsze na wszelkie dźwięki, niż w zwykłem powietrzu, jak to mogą poświadczyć ci, którzy znajdowali się kiedyś pod dzwonem nurkowym na dnie morza.

Opisane wyżej doświadczenie dowodzi, że w próżni dźwięk się nie rozchodzi, dalej—że, pomiędzy innemi, ciała gazowe mogą być środkami dla rozprzestrzeniania się dźwięku. Nie wszystkie jednak gazy posiadają tę własność w równej mierze, tak naprzykład wodór—jak to wykazał Tyndall—przy jednakowem ciśnieniu, jest o wiele gorszym przewodnikiem dźwięku, niż powietrze, chociaż szybkość dźwięku w wodorze jest prawie 4 razy większa, niż w powietrzu.

I ciała stałe są przewodnikami dźwięku, lecz w bardzo różnym stopniu, a to zależnie od ich sprężystości. Jeżeli naprzykład w powyżej opisanem doświadczeniu, po osiągnięciu możliwie zupełnej próżni, zbliżymy ucho do klosza, to usłyszymy słaby dźwięk uderzającego młotka, przenoszący się przez poduszkę i talerz maszyny pneumatycznej na otaczające powietrze. Gdybyśmy zaś zupełnie usunęli poduszkę i ustawili zegar bezpośrednio na talerzu, to nawet po osiągnięciu całkowitej prawie próżni, odnośny dźwięk przeszedłby prawie wcale nieosłabiony przez masę talerza do otaczającego powietrza, a następnie do naszego ucha.

Woda jak i wszelkie inne ciecze są również dobremi przewodnikami dźwięku, rozchodzi się on nawet w nich z większą

szybkością i natężeniem, niż w powietrzu. Nurek naprzykład, znajdujący się pod wodą, słyszy tak lekki szmer, jakiegoby nie zauważył w powietrzu.

Następujące doświadczenie pokazuje, że dźwięk lepiej się rozprzestrzenia przez ciała stałe, niż przez powietrze: Jeżeli położymy zegarek kieszonkowy na jednym końcu nawet bardzo długiej belki drewnianej albo sztaby metalowej, do drugiego zaś jej końca przyłożymy ucho, wtedy wyraźnie usłyszymy bicie zegarka, jakkolwiek ci, którzyby stali w bliższej odeń odległości, lecz z boku belki, nicby nie słyszeli. „W celu bliższego zbadania tych warunków, Hassenfratz—jak opowiada Haüy—udał się do kamieniołomów pod Paryżem i polecał tam towarzyszowi swemu uderzać młotkiem o kamienną ścianę podziemnego korytarza. Sam on oddalał się coraz bardziej od miejsca uderzeń i przykładał w różnych punktach ucho do ściany; w ten sposób udało mu się znaleść punkt, w którym słyszał podwójnie każde uderzenie: raz przez ścianę, drugi raz—przez powietrze. Dźwięk dochodził przytem do jego ucha prędzej przez kamień, niż przez powietrze; natomiast natężenie dźwięku malało wraz z odległością w pierwszym wypadku szybciej, niż w drugim: podczas gdy dźwięk poprzez kamień zamilkał już w odległości 134 kroków, to przez powietrze natomiast mógł być jeszcze słyszany na odległości 400 kroków.“ Podobne doświadczenia, częstokroć wykonywane z belkami drewnianemi i sztabami metalowemi, potwierdziły powyższy rezultat, tak pod względem zwiększonej szybkości, jak i zmniejszonego natężenia dźwięku.

Stała skorupa ziemska także przeprowadza na znaczną odległość niezbyt donośne nawet dźwięki, nie bez racyi przeto indyanin amerykański przykłada ucho do ziemi, aby śledzić ruchy oddalonego jeszcze nieprzyjaciela i usłyszeć tentent kopyt końskich. Na wielką zwłaszcza odległość rozchodzi się po powierzchni ziemi dźwięk, towarzyszący eksplozyom, salwie armatniej, trzęsieniom ziemi lub wybuchom wulkanów. Pozwolimy sobie przytoczyć tutaj słowa Aleksandra Humboldt'a: „W Caracas, na równinach Calabozo i nad brzegami Rio Apure—rzeczki, wpadającej do Orinoco—na przestrzeni, obejmującej około 130,000 ki-

lometrów kwadratowych, słyszano wszędzie dnia 30 kwietnia 1812 r., okropny huk podziemny—a nie było wtedy w okolicy żadnego trzęsienia ziemi—w chwili, gdy wulkan Św. Wincentego, leżący o 12,000 kilometrów ku północo-wschodowi na jednej z wysp Antylskich, wyrzucał ze swego krateru potężny strumień lawy. Pod względem odległości znaczy to tak samo, jak gdyby wybuch Wezuwijusza słyszano w północnej Francyi. W r. 1744, podczas gwałtownego wybuchu wulkanu Cotopaxi, słyszano w Honda nad rzeką Magdaleną jakby podziemną salwę armatnią. Otóż szczyt rzeczonego wulkanu leży nietylko o 5,500 metrów wyżej nad poziomem morza, niż Honda i znajduje się odeń na odległości 810 kilometrów, lecz nadto dwa te punkty przedzielone są olbrzymiemi masami gór Quito, Pasto i Popayan, jako też niezliczonemi dolinami i przepaściami. *Dźwięk ten z pewnością został przeprowadzony nie przez powietrze, lecz przez ziemię i to na znacznej głębokości.* Podczas gwałtownego trzęsienia ziemi w Nowej Granadzie (w lutym 1835 r.) słyszano podziemny huk jednocześnie w Popayan, Bogota, Santa Marta i Caracas (tu przez 7 godzin z rzędu, przyczem nikt nie czuł żadnego wstrząśnienia), w Haiti, na wyspie Jamajce i wokoło jeziora Nicaragua.“

Widzieliśmy, że rozprzestrzenianie się dźwięku odbywa się przy pomocy jakiegoś środka stałego, ciekłego lub gazowego; zwykle jednak środkiem tym jest powietrze. Z tego ostatniego faktu wynika, że państwo dźwięku rozpościera się tylko tak daleko, dokąd sięga nasza atmosfera: najgwałtowniejszy wybuch jakiegoś wulkanu na ziemi nie mógłby naprzykład być słyszany przez ewentualnego mieszkańca księżyca. Z drugiej strony mieszkańcy ziemi, jakkolwiek mogliby przy sprzyjających okolicznościach widzieć katastrofę, dotyczącą jakiegoś ciała niebieskiego, nie mogliby jednak słyszeć przytem żadnego dźwięku. Detonacye aerolitów dowodzą tedy, że ciała te w chwili eksplozyi znajdują się już w granicach naszej atmosfery, inaczej bowiem nie moglibyśmy ich słyszeć. Nawet już na szczytach wysokich gór, gdzie powietrze jest o wiele rzadsze, niż w równinach, natężenie dźwięku znacznie się zmniejsza. Według

de Saussure'a i innych, wystrzał z pistoletu na szczycie Mont-Blanc brzmi nie głośniej, jak w równinie—eksplozya drobnego kapiszonu. Ch. Martins, opisując burzę, jaka go zaskoczyła na rzeczonej wysokości, powiada, że „grzmot tam wcale się nie rozlega, lecz daje krótki urwany dźwięk, podobnie jak w dolinie—wystrzał z broni palnej.“

Inny ciekawy szczegół, dotyczący tej kwestyi, podaje Gay-Lussac: gdy podczas jednej ze sławnych podróży nadpowietrznych wzniósł się balonem na wysokość 7,000 metrów, wtedy pomimo wszelkiego wysiłku płuc, nie mógł wymówić słów, któreby mu się wydały głośniejszemi od przytłumionego szeptu.

§ 4. Prędkość dźwięku w powietrzu i w innych środkach.

Wspomnieliśmy już o tem, że rozprzestrzenienie się dźwięku wymaga pewnego czasu: otóż teraz opiszemy metody, za pomocą których oznaczono prędkość dźwięku w różnych środkach, przedewszystkiem zaś w powietrzu.

Różni uczeni, jak Boyle, Newton, Laplace, Mersenne, Flamsteed oraz wielu innych, usiłowali rozwiązać to zadanie, bądź na drodze teoretycznej, bądź też za pomocą odpowiednich doświadczeń; wartości jednak, przez nich otrzymane, okazały się zbyt duże lub za małe. Pierwsze dokładne pomiary w tym względzie zawdzięczamy paryzkiej Akademii nauk z r. 1738. Później, w r. 1822 kilku uczonych z paryzkiego *Bureau des longitudes* połączyło się w celu dokładnego zmierzenia prędkości dźwięku w powietrzu za pomocą metody, proponowanej już dawniej przez rzeczoną Akademię we wskazanym roku i która to metoda w ich ręku dopiero wydała pożądane rezultaty.

Obrano dwie stacye w blizkości Paryża—Montlhéry i Villejuif, leżące na wzgórzach, pomiędzy któremi nie znajduje się żadna przeszkoda, mogąca zasłonić widok z jednej z nich na drugą. Podzielono się na dwie grupy, z których jedna—Gay-Lussac, Humboldt i Bouvard—udała się do Montlhéry, druga zaś—Prony, Arago i Mathieu—do Villejuif. Na każdej stacyi znajdowały się armaty jednakowego kalibru, naładowywane równemi

ilościami prochu oraz możliwie dokładne chronometry. Doświadczenia rozpoczęły się o 11 wiecz. przy pogodnem niebie i dosyć spokojnem powietrzu przy temperaturze 16° C. Z każdej stacyi dano 12 strzałów w odstępach 10-minutowych i każda grupa obserwatorów starannie zaznaczała liczbę sekund, upływających od pojawienia się światła przy wystrzale aż do usłyszenia dźwięku (fig. 158). Przeciętna wszystkich otrzymanych w ten sposób



Fig. 158. Oznaczenie prędkości dźwięku w powietrzu między stacyami Montlhery i Villejuif w r. 1822.

wartości wynosiła 54,6 sekundy, a że odległość pomiędzy rzeczonemi punktami, na podstawie pomiarów trygonometrycznych, równa się 18613,5 metra, z tego więc wypada, że dźwięk w powietrzu przy temperaturze 16° C. rozchodzi się z prędkością 340,9 metra na sekundę. Ponieważ temperatura, jak wykazały teorya i doświadczenie, wpływa na prędkość dźwięku, która zwiększa się mianowicie wraz z podnoszeniem się temperatury

i naodwrót, to chcąc otrzymać prędkość dźwięku w powietrzu dla temperatury topniejącego lodu, t. j. 0°, należy powyższą wartość nieco zredukować. Przez strzelanie naprzemian z każdej stacyi, miano na celu zrównoważenie ewentualnego wpływu wiatru: każdy bowiem prąd powietrza zwiększa prędkość dźwięku w kierunku samego prądu, zmniejsza zaś ją w kierunku przeciwnym.

Oprócz wymienionych, kwestyą prędkości dźwięku w powietrzu, zajmowali się jeszcze: Benzenberg w r. 1811, Goldingham w 1821, Moll, Van Beck, Stämpfer i Myrbach—w 1822, Bravais i Martins—w 1844 i inni. Jeżeli obliczymy otrzymane przez nich prędkości dla 0° i dla zupełnie suchego powietrza, to otrzymamy przeciętną wartość 332 metr. na sekundę, nieco większą od tej, jaka wypada z doświadczeń powyżej opisanych.

Nietylko jednak temperatura, lecz także stopień wilgoci powietrza wywiera znaczny wpływ na prędkość dźwięku, oznaczenia więc, czynione w swobodnem powietrzu, zawierają błędy nie dające się sprostować; warstwy bowiem atmosfery, przez które przechodzi dźwięk, nie są wszędzie jednorodne i trudno oznaczyć stopień ich wilgoci. Dla uniknienia tych błędów, Le Roux oznaczył prędkość dźwięku w walcowatej rurze, 72 metr. długiej, którą napełnił zupełnie suchem powietrzem i którą przez okładanie lodem utrzymywał stale przy temperaturze 0°, przyczem oba końce rury zamknięte były przez silnie naciągnięte błony kauczukowe. Dźwięk wywoływano przez jednorazowe uderzenie drewnianym młotkiem o jednę z błon; moment, w którym to następowało, oraz ten, w którym dźwięk napotykał drugą błonę, zapisywane były na jednostajnie obracającym się walcu pokrytym papierem, przez automatyczny przyrząd, będący w związku z błonami; czas zaś, jaki upływał od jednego momentu do drugiego, mierzono za pomocą specyalnego rodzaju chronoskopu. Z szeregu starannie wykonanych w ten sposób doświadczeń Le Roux otrzymał dla temperatury 0° prędkość dźwięku równą 330,6 metr., która to wartość jest prawie identyczna z tą, jaka wypada dla tej samej temperatury 0°, z doświadczeń uczonych z Bureau des Longitudes w r. 1822.

Wysokie i nizkie, silne i słabe dźwięki rozchodzą się w powietrzu z jednakową prędkością, czego dowodzi fakt, że charakter jakiegoś utworu muzycznego, wykonywanego przez orkiestrę, nie zmienia się pod względem rytmu i czystości akordów, niezależnie od tego, czy słuchamy utworu z blizka, czy też z większej odległości. Im bardziej oddalamy się od źródła dźwięku, tem więcej słabnie natężenie wszystkich dźwięków, lecz w jednakowej mierze, a jestto jedyna zmiana, którą możemy przy tem zauważyć. Gdyby prędkość dźwięku była dla różnych tonów niejednakowa, wtedy najlepiej wykonany utwór muzyczny musiałby w pewnej odległości wywierać na nas wrażenie chaosu.

Nadmienić tu także wypada, że prędkość dźwięku jest taka sama w kierunku pionowym, jak w poziomym lub pochyłym; dowodzą tego doświadczenia, wykonane w r. 1844 przez Martins'a i Bravais'go pomiędzy szczytem a podstawą góry Faulhorn w Alpach Berneńskich oraz doświadczenia, poczynione przez Stämpfera i Myrbacha pomiędzy dwoma punktami, leżącemi na różnej wysokości nad poziomem morza.

Z porównania prędkości światła, dźwięku i pocisków z broni palnej wynikają niektóre ciekawe wnioski. Tak naprzykład żołnierz, ugodzony kulą armatnią, może jeszcze przedtem widzieć ogień, towarzyszący wystrzałowi, lecz nie może słyszeć tego ostatniego dlatego, że prędkość kuli armatniej jest większa, niż prędkość dźwięku. Rzecz się zmienia w wypadku znacznej odległości: opór bowiem powietrza na tyle zmniejsza wtedy prędkość kuli, że żołnierz może słyszeć wystrzał, zanim zostaje ugodzony. Weźmy jeszcze inny przykład: Wyobraźmy sobie, że w punkcie tak położonym, iż wskutek ruchu obrotowego ziemi około osi, posuwa się on naprzód z prędkością 331 metr. na sekundę, oznajmiają południe przez wystrzał armatni, wtedy dźwięk ten będzie usłyszany we wszystkich miejscach, leżących na zachód od rzeczonego punktu, dokładnie w chwili, gdy i dla nich nastąpi południe.

W cieczach dźwięk rozchodzi się daleko prędzej, niż w gazach; prędkość dźwięku w wodzie jest około $4^1/_2$ razy większa,

niż w powietrzu, jak to wykazały doświadczenia, wykonane w r. 1827 przez Colladona i Sturma na jeziorze Genewskiem. Badacze ci umieścili się w łódkach, z których jedna znajdowała się około Thonon, druga zaś—blizko przeciwległego brzegu jeziora i dawali sobie sygnały za pomocą dzwonu, zanurzonego w wodzie i uderzanego tamże młotkiem. Na przeciwległej stacyi dźwięk przejmowany był przez tubę, której szeroki otwór



Fig. 159. Oznaczenie prędkości dźwięku w wodzie.

również był zanurzony w wodzie i zamknięty cienką blaszką metalową; obserwator na tej stacyi mierzył, za pomocą dokładnego chronometru, czas, jakiego potrzebował dźwięk dla przeniesienia się od jednej łódki do drugiej poprzez wodę. Do młotka, uderzającego o dzwon, przytwierdzona była poruszająca się wraz z nim dźwignia z zapalonym lontem, który w chwili uderzenia zapalał pewną ilość prochu, co było znakiem dla obserwatora, znajdują-

cego się w drugiej łódce, że w tym momencie następowało uderzenie. Cały sposób urządzenia doświadczeń pokazują figury 159 i 160, nie wymagające dalszego objaśnienia. Odległość pomiędzy obydwiema stacyami wynosiła 13487 metrów, drogę tę dźwięk przebiegał przez wodę przy temperaturze 8^0 C. w ciągu 9,4 sekund, ztąd prędkość dźwięku w wodzie wypada równą 1435 metrów na sekundę.

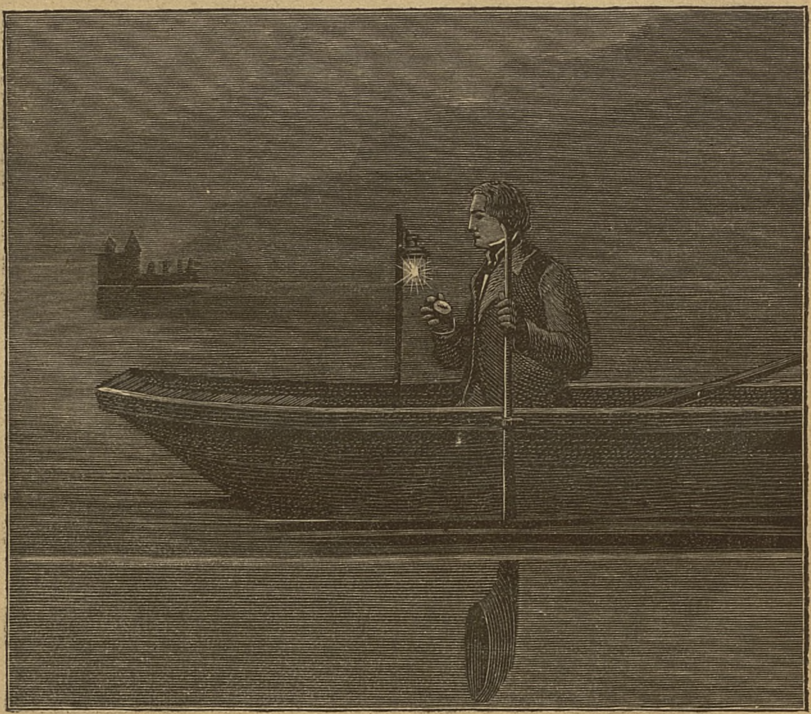


Fig. 160. Doświadczenia Colladona i Sturma, wykonane na jeziorze Genewskiem.

Prędkość dźwięku w ciałach stałych także niejednokrotnie była oznaczana na drodze doświadczalnej przez Chladni'ego, Biot'a, Wertheima i innych. Przy użyciu sztaby z lanego żelaza, mającej 951 metrów długości, Biot znalazł, iż dźwięk rozprzestrzenia się w niej z prędkością 3250 metrów na sekundę, a więc z prędkością, przeszło $9\frac{1}{2}$ razy większą, niż w powietrzu. Następująca tabliczka podaje prędkość dźwięku w różnych ciałach stałych, cieklych i gazowych:

Prędkość dźwięku w gazach przy 0°:

w wodorze	1270	metr. na sek.
w amoniaku	407	„ „ „
w powietrzu	331	„ „ „
w tlenie	317	„ „ „
w kwasie węglanym . . .	262	„ „ „

Prędkość dźwięku w cieczach:

w wodzie rzecznej (Sekwana)	1437	metr. na sek.
w wodzie morskiej przy 20°	1453	„ „ „
w absolutnym alkoholu przy 23°	1160	„ „ „
w eterze siarczanym przy 0°	1159	„ „ „

Prędkość dźwięku w ciałach stałych:

w cynie	2498	metr. na sek.
w srebrze	2684	„ „ „
w stali	5030	„ „ „
w miedzi	3716	„ „ „
w szkle	5438	„ „ „
w drzewie dębowem . . .	3440	„ „ „

§ 5. Odbijanie i załamywanie się dźwięku.

Dźwięk od ciała dźwięczącego rozchodzi się na wszystkie strony z jednakową prędkością i po líniach prostych, jeżeli środek, w którym się rozprzestrzenia, posiada wszędzie jednakową gęstość. Na granicy natomiast dwóch środków różnej gęstości, naprzykład powietrza i wody, dźwięk w części się *odbija* od powierzchni, oddzielającej oba środki, w części zaś przenika dalej ze zmienioną prędkością i zbacza od pierwotnego swego kierunku, czyli, jak mówimy, ulega *załamaniu.* Jeżeli zaś dźwięk pada na stałą przeszkodę, to prawie całkowicie zostaje od niej odbity.

Nazwijmy linie proste, wychodzące z punktu wytwarzania dźwięku, *promieniami* tegoż. Niechaj dźwięk pada w kierunku promienia *f n* na powierzchnię *s ś*, oddzielającą dwa środki o różnej gęstości, naprzykład powietrze i wodę, wtedy po części

przenika on do wody, po części zaś odbija się od niej i przyjmuje kierunek promienia *n d*. Poprowadźmy w punkcie *n* prostopadłą *n p* do powierzchni *s ś*; kąt, jaki tworzy promień *n f* z tą prostopadłą, nazywamy kątem *padania*, zaś ten, jaki tworzy z nią promień *n d*, nazywamy kątem *odbicia* (fig. 161).

Otóż odbijanie się dźwięku, częściowe czy całkowite, zawsze podlega następującemu prawu: *Promienie padający i odbity leżą w jednej płaszczyznie z prostopadłą, poprowadzoną w punkcie padania; kąt padania równa się kątowi odbicia.* Obserwator więc, znajdujący się w jakimkolwiek punkcie na linii *n d*, słyszy dźwięk tak, jak gdyby ten wychodził z punktu *n*, albo z innego punktu, leżącego na przedłużeniu linii *n d*. Odbijanie się dźwięku zachodziłoby według tego samego prawa i wtedy, gdyby *s ś* przedstawiała powierzchnię odgraniczającą dwa różne gazy, albo dwie warstwy tego samego gazu, lecz różnej gęstości, albo nareszcie—powierzchnię ciała stałego, tylko że w tym ostatnim wypadku odbity dźwięk byłby o wiele silniejszy. Z powyższego prawa wynika, że jeżeli dźwięk pada prostopadle na jakąś ścianę, to odbija się od niej w tym samym kierunku.

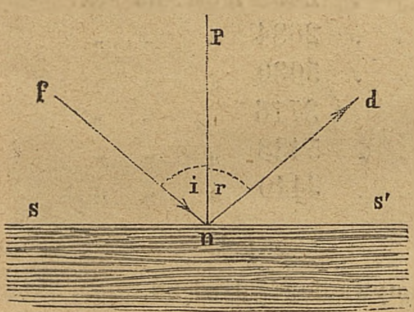


Fig. 161. Odbijanie się dźwięku.

Do doświadczalnego stwierdzenia słuszności rzeczonego prawa używają wklęsłych metalowych zwierciadeł parabolicznych, t. j. zwierciadeł, których powierzchnie możemy sobie wyobrazić jako powstałe przez obracanie paraboli naokoło osi. Mówiąc o maszynie Morina (patrz str. 29), wymieniliśmy już niektóre własności paraboli, tutaj zaś dodamy do tego jeszcze co następuje. Jeżeli na powierzchnię paraboliczną (fig. 162, str. 243) padają promienie, biegnące równolegle do jej osi, wtedy odbijają się one od tej powierzchni tak, że wszystkie następnie znowu się zbiegają w jednym wspólnym punkcie *F*, zwanym *ogniskiem* paraboli dlatego, że, jak to się dowodzi w geometryi, linie te, naprzy-

kład $Z M$ i $M F$, tworzą z prostopadłą w punkcie padania kąty równe. Naodwrót: wszystkie promienie, wychodzące z ogniska, padając na powierzchnię paraboliczną, odbijają się od niej tak, że przyjmują kierunek równoległy do osi. Jeżeli przeto ustawimy naprzeciw siebie dwa paraboliczne zwierciadła w ten sposób, ażeby ich osie leżały na jednej prostej linii (fig. 163, str. 244) i w ognisku jednego z nich umieścimy zegarek, wtedy wychodzące zeń promienie dźwięku, padając na zwierciadło, zostają odeń odbite równolegle do osi, a więc padają na drugie zwierciadło także równolegle do osi i po powtórnem odbiciu zbierają się w jego ognisku. Gdy więc w tem ostatniem ognisku umieścimy koniec tuby, drugi zaś jej koniec przyłożymy do ucha, to wyraźnie usłyszymy bicie zegarka, czego nie moglibyśmy zauważyć w punktach, o wiele bliżej niego leżących.

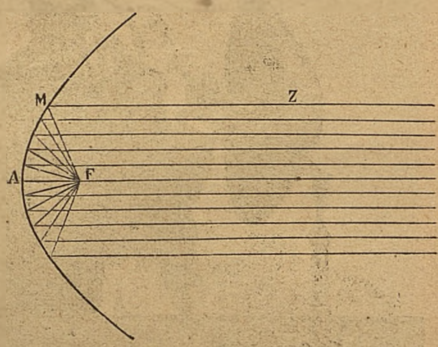


Fig. 162. Własność paraboli.

Podobną własność posiada także krzywa linia, zwana *elipsą*, tylko że w niej znajdują się dwa odniska, pozostające w takim z sobą związku, że promienie, wychodzące z jednego z nich, zbierają się w drugiem. Odbijanie się dźwięku od powierzchni elipsoidalnej, t. j. takiej, która powstaje przez obracanie się elipsy naokoło osi, następuje w podobny sposób, jak od dwóch ustawionych naprzeciw siebie zwierciadeł parabolicznych. Słabe dźwięki, wytwarzane w jednem ognisku elipsoidalnego sklepienia, łatwo więc mogą być usłyszane w drugiem, trudno zaś je zauważyć w punktach, położonych między obu ogniskami. Sala z takiem sklepieniem znajduje się, pomiędzy innemi, w muzeum starożytności w Paryżu (fig. 164, str. 245). Na odbijaniu się dźwięku polega wiele przyrządów wzmacniających go, jak np. t. zw. trąbki akustyczne, tuba, stetoskop i t. p.

Na tem samem polegają także znane powszechnie zjawiska odgłosu i echa. Gdy mówimy w dostatecznie dużym pokoju, którego ściany nie są pokryte kobiercami lub innemi przedmiotami, przytłumiającemi dźwięk, wtedy łatwo możemy zauważyć wzmocnienie naszego głosu, o wiele też donośniej rozlegają się wtedy kroki chodzących osób, uderzenia o twarde przedmioty i t. d. (odgłos). Znajdujący się na pewnej odległości mur, las lub góra powtarzają oddzielnie wymawiane przez nas zgłoski lub całe słowa (echo). Pochodzi to ztąd, że dźwięki odbite zlewają się

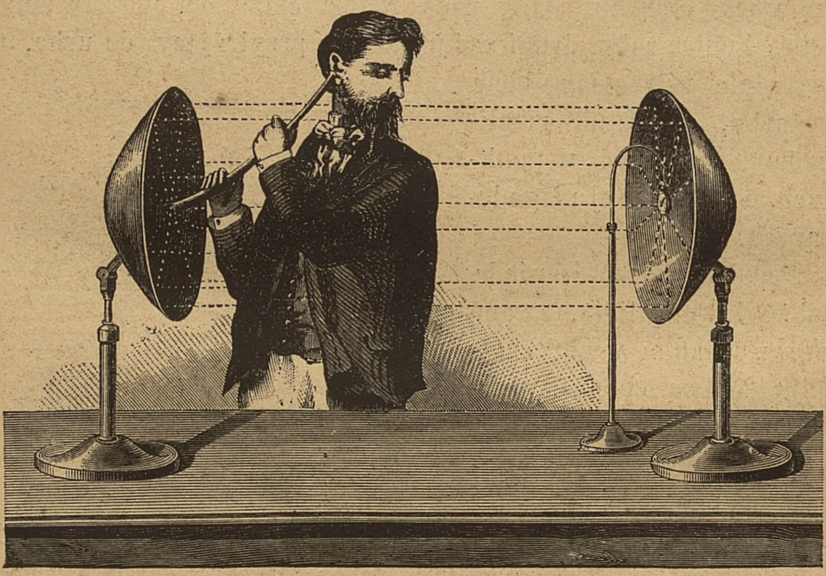


Fig. 163. Odbijanie się dźwięku od zwierciadeł parabolicznych.

z bezpośrednio wydawanemi; zależnie od czasu, jaki ubiega pomiędzy drugiemi a pierwszemi, powstaje odgłos, albo jedno—lub wielozgłoskowe echo.

Należy mianowicie zauważyć, że wrażenie, wywołane w nas przez jakiś dźwięk, nie znika wraz z jego ustaniem, lecz trwa jeszcze nadal przez pewien czas, oceniany zwykle na $^1/_{10}$ sekundy. W tym jednak czasie, jak już wiemy, dźwięk przebiega drogę, przybliżenie równą 34 metr. (w ciągu bowiem 1 sekundy

dźwięk w powietrzu przebywa drogę, równą w okrągłych cyfrach 340 metr.). Jeżeli więc znajdujemy się na odległości, mniejszej niż $^{34}/_{2}$ czyli 17 metr. od ściany odbijającej (fig. 165, str. 246), wtedy dźwięk wymówionej przez nas zgłoski ma dosyć czasu dla przebycia drogi od nas do ściany i napowrót—*O A* i *A O*—zanim jeszcze ustanie wrażenie, spowodowane przez usłyszenie danej zgłoski. Dźwięk odbity zlewa się przeto z bezpośrednio wytworzonym, wskutek czego przedłuża się tylko czas, podczas którego słyszymy wymówioną zgłoskę, oraz wzmacnia się jej brzmienie,

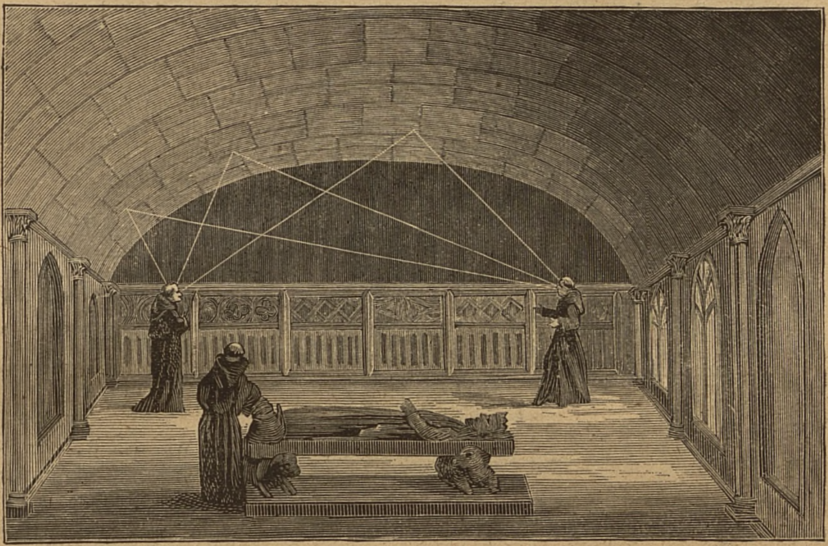


Fig. 164. Odbijanie się dźwięku od elipsoidalnego sklepienia.

czyli powstaje *odgłos*. Przeciwnie, gdy odległość *O A* wynosi więcej, niż 17 metrów, wtedy wrażenie, spowodowane przez bezpośrednie usłyszenie wymówionej zgłoski ustaje wcześniej, nim dźwięk odbity od ściany wpada do naszego ucha tak, że odnośną zgłoskę słyszymy po raz drugi, jakkolwiek nieco słabiej i powstaje *echo*. Im bardziej oddalona jest ściana odbijająca, tem później wraca odbity od niej dźwięk, tem więcej przeto zgłosek możemy w tym czasie wymówić; powstaje wtedy *wielozgłoskowe echo*. Możemy naprzykład wygodnie wymówić 4 zgłoski w ciągu 1 sekundy, dajmy na to wyraz „Ameryka“; w czasie tym dźwięk przebiega

drogę 340 metr. Gdy więc ściana odbijająca znajduje się od nas na odległości większej niż 170 metr., to echo pierwszej zgłoski „a“ dojdzie naszego ucha już po ustaniu wrażenia, spowodowanego przez wygłoszenie ostatniej — „ka“, tak że usłyszymy oddzielnie powtórzony przez echo cały rzeczony wyraz. Na tej samej zasadzie polegają *echa wielokrotne*, t. j. takie, które kilka razy powtarzają dany wyraz. Jeżeli mianowicie w różnych odległościach znajduje się kilka ścian, bądź równoległych, bądź tworzących z sobą pewien kąt, wtedy dźwięk od niektórych z nich odbija się tak, iż wprost wraca do nas, od innych zaś tak, że poprzednio pada na nową ścianę i dopiero po odbiciu się od niej, dochodzi naszego ucha.

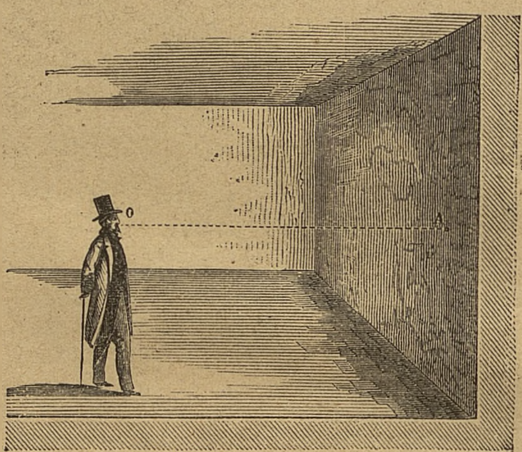


Fig. 165. Odbijanie się dźwięku. · Odglos i echo.

„Odbijanie się dźwięku — powiada Tyndall — od ścian dużej nieumeblowanej sali powoduje częstokroć dziwne zjawiska. Gdy stoimy naprzykład na galeryi giełdy paryzkiej, wtedy uszu naszych dochodzi tylko zagmatwany zgiełk zebranego na dole tłumu. Widzimy poruszenia ust, rąk i ramion, wiemy, iż prowadzą tam na dole ożywioną rozmowę, nie możemy jednak rozróżnić tego, co mówią. Głosy oddzielnych osób zlewają się z echami w jeden chaos, z którego ucho nie może wyosobnić żadnego zrozumiałego dźwięku. Echa, powstające w sali, zostają przytłumione przez meble lub inne podobne przedmioty. W obecności nadto sluchaczy możemy łatwo zrozumieć czyjąś mowę, którąby zaciemniły echa pustej sali. Gdy 16 maja 1865 r. wypadło mi wyglosić prelekcyę w jednej z sal uniwersytetu w Cambridge, spróbowałem przedtem, jak glośno musiałbym mówić,

ażeby głos mój był wszędzie wyraźnie słyszany i wielce przestraszyła mnie okoliczność, że przyjaciel mój, znajdujący się w odległym zakątku sali, nie mógł zrozumieć mych słów z powodu częstego i nieprawidłowego echa. Zgromadzeni atoli słuchacze do tego stopnia przytłumili rozchodzący się dźwięk, że głos mój wyraźnie był słyszany we wszystkich punktach sali.“

„Chmury także mniej lub więcej silnie odbijają dźwięk. Przy pogodnem niebie wystrzał armatni na otwartem polu daje urwany i ostry dźwięk, podczas gdy obecność jednej chociażby chmury wystarcza do wywołania echa, podobnego do rozlegania się oddalonego grzmotu. Słabe echo powstaje również wtedy, gdy dźwięk przechodzi z jednej warstwy powietrza do innej o różnej gęstości. Humboldt opowiada, że w pewnej miejscowości dźwięk wielkich wodospadów rzeki Orinoco podobny jest do tego, jaki słyszymy przy rozbijaniu się fal morskich o nadbrzeżne skały i że nadto w nocy jest on o wiele donośniejszy, niż za dnia. Nie można tego przypisywać większej ciszy nocnej, dlatego, że brzęk owadów i ryk dzikich zwierząt czynią w tamtych okolicach noc o wiele niespokojniejszą, niż dzień. Humboldt tłómaczy powyższe zjawisko w następujący sposób: Pomiędzy nim a wodospadami znajdowala się wielka polanka, na której wznosily się liczne nagie skały. W dzień słońce rozgrzewało te skały do temperatury znacznie wyższej, niż otaczającą je trawę; nad niemi więc unosił się słup rozgrzanego powietrza, znacznie rzadszego, niż to, które znajdowało się ponad trawą. W dzień przeto dźwięk musiał przechodzić przez atmosferę, której gęstość często się zmieniała; częściowe echa, powstające na granicy, oddzielającej warstwy rzadkiego i gęstego powietrza, kilka razy się powtarzały, wskutek tego zaś dochodzący jego uszu dźwięk był znacznie osłabiony. W nocy te różnice temperatury ustawały, dźwięk od wodospadów przechodził przez atmosferę o jednostajnej gęstości i dosięgał jego uszu, nie będąc osłabiony przez kilkakrotne odbicie.“

„Sir John Herschel podaje, pomiędzy innemi, następujące przykłady sławnych ech: W parku w Woodstock echo powtarza 17 zgłosek w dzień i 20 w nocy; nad brzegami jeziora del Lupa,

niedaleko wodospadu Terni echo powtarza każdy wyraz 15 razy. W kościele opactwa Św. Albana słychać bicie zegarka od jednego końca kościoła do drugiego. Ośmiokątna galerya katedry w Gloucester przenosi cichy szept na odległość 25 metrów. W galeryi szeptów w kościele Św. Pawła najbardziej nawet słaby dźwięk przenosi się z jednego końca kopuły na drugi, nie słychać go zaś wcale w punktach, leżących pomiędzy niemi. W Canisbrook Castle na wyspie Wight znajduje się studnia, 71 metr. głęboka i 4 metr. szeroka, której wnętrze pokryte jest gładkim murem; gdy do tej studni wpada igła, to po niejakim czasie słychać uderzenie jej o wodę.“

Nadmieniliśmy już, że dźwięk rozprzestrzenia się w różnych środkach z niejednakową prędkością tak, że gdy przechodzi z jednego środka do innego, prędkość jego albo się zwiększa, albo zmniejsza. Ujawnia się zaś to w ten sposób, że gdy promień dźwięku pada pochyło na powierzchnię oddzielającą oba środki, wtedy w pierwszym z powyższych wypadków jeszcze bardziej się odchyla od prostopadłej w punkcie padania, w drugim zaś — zbliża się do niej. To samo daleko łatwiej wykazać dla promieni światła, dla którego o wiele dawniej już skonstatowano odnośne zjawisko, zwane *załamywaniem* się promieni świetlnych. Prawo tych zjawisk szerzej wyłuszczymy w 3-ej księdze, traktującej o świetle, tutaj zaś opiszemy tylko nader ciekawe doświadczenie, które dowodzi, że i promienie dźwięku przy przejściu z jednego środka do innego zostają załamane.

Fizyk Sondhaus naciągnął na metalową obręcz dwie błony z kolodyum, wolną zaś przestrzeń pomiędzy niemi wypełnił kwasem węglanym (w którym dźwięk rozchodzi się wolniej, niż w powietrzu) tak, że cały przyrząd przybrał postać dwuwypukłej soczewki, którą można było zamykać za pomocą kranu (fig. 166, str. 249). Jeżeli w pewnych warunkach istotnie następuje załamanie się dźwięku, to rozbieżne promienie padające z jednej strony na taką soczewkę, muszą się znowu zjednoczyć w jednym punkcie po drugiej jej stronie, podobnie jak to się dzieje z rozbieżnemi promieniami światła, padającemi na wypukłą soczewkę ze szkła. Otóż gdy Sondhaus umieścił zegarek na osi opisanej

tutaj soczewki, wtedy w pewnym punkcie po drugiej jej stronie mógł wyraźnie słyszeć bieg zegarka, czego nie mógł zauważyć w innych punktach, o wiele bliżej niego położonych. Promienie dźwięku zostały więc przez soczewkę tak załamane, że znowu się zjednoczyły w jednym punkcie, co dowodzi, że przy wejściu do soczewki i przy wyjściu z niej zmieniają one swój kierunek.

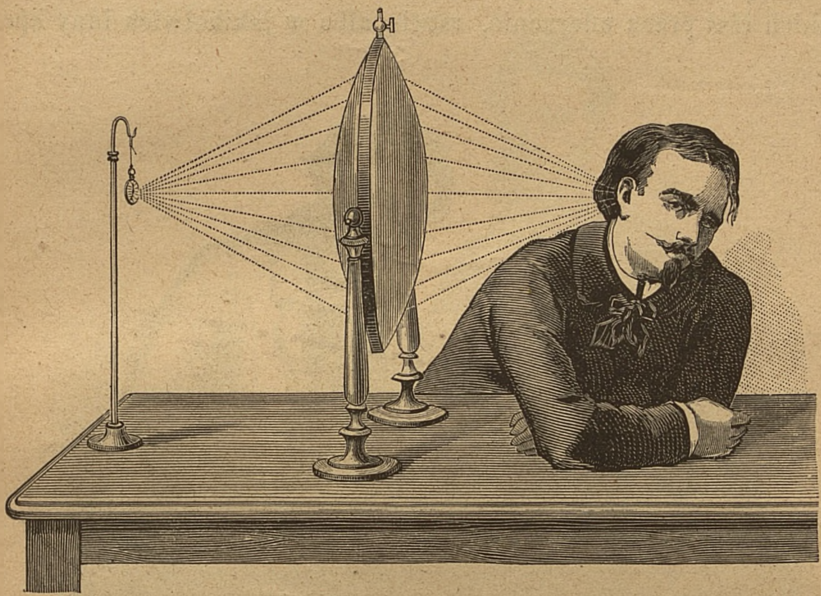


Fig. 166. Załamywanie się dźwięku. Przyrząd Sondhaus'a.

ROZDZIAŁ II.

Istota dźwięku.

§ 1. Ciało, wydające dźwięk, znajduje się w stanie ruchu drgającego.

Dotychczas nie zadawaliśmy sobie jeszcze pytania, na czem polega dźwięk, to jest co zachodzi w ciele dźwięczącem oraz w środku, w którym dźwięk się rozprzestrzenia. Dalszy jednak wykład traktowanego tu przedmiotu byłby bardzo utrudniony,

jeżeli nie niemożliwy bez poprzedniego zbadania tej kwestyi. Odkładając bliższe rozważenie procesu, jaki zachodzi w środku, przenoszącym dźwięk, do następnego §, w niniejszym zajmiemy się stanem ciała dźwięczącego.

Bardzo proste doświadczenia pokazują, że dźwięk wydawać mogą tylko ciała sprężyste, t. j. takie, których cząstki, będąc wyprowadzone z pierwotnie zajmowanego położenia, z mniejszą lub większą mocą usiłują doń wrócić. Gdy przesuwamy cząstki takich ciał przez uderzenie, tarcie albo w jakikolwiek inny spo-

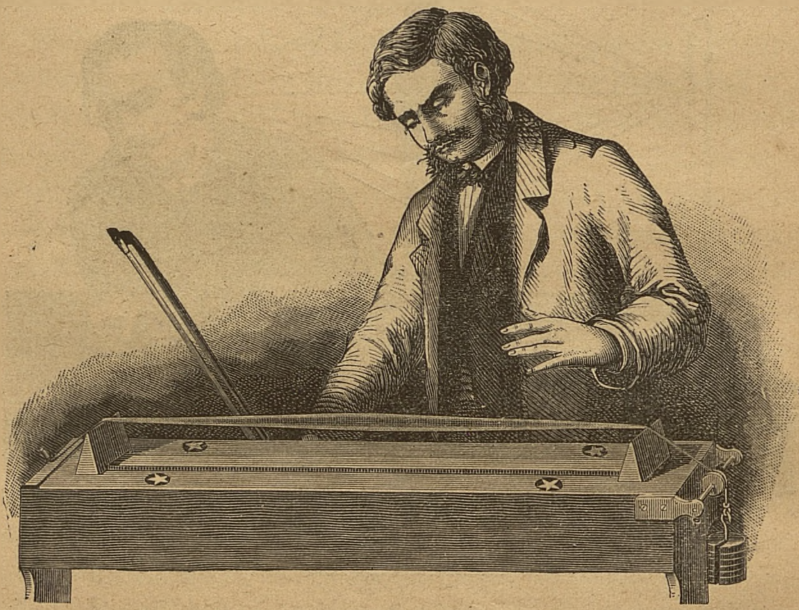


Fig. 167. Drgania wyprężonej struny.

sób, wracają one z pewną prędkością do swego pierwotnego położenia; dotarłszy jednak doń nie zatrzymują się, lecz wskutek raz nabytej prędkości oscylują w drugą stronę na podobieństwo wahadla i przychodzą w stan spoczynku dopiero po wykonaniu pewnej liczby drgań. Oscylacye te czyli drgania przenoszą się we wszystkich kierunkach na otaczające ciała—stale, ciekłe, czy też lotne i za ich pośrednictwem dochodzą naszego ucha.

Łatwo można wykazać, że ciało dźwięczące istotnie znajduje się w stanie mniej lub więcej szybkiego ruchu drgającego. Pociągnijmy wyprężoną strunę smyczkiem skrzypcowym albo zarwijmy ją ku górze palcem, a usłyszymy pewien określony ton. Jednocześnie struna będzie się nam wydawała jakby nabrzmiałą od końców ku środkowi. Pochodzi to ztąd, że oko, podobnie jak i ucho, zachowuje doznane wrażenie jeszcze przez pe-



Fig. 168. Drgania sztaby metalowej.

wien czas po ustaniu działającej przyczyny: szybko drgająca struna zajmie więc już nowe położenie, zanim jeszcze oko traci wrażenie, spowodowane poprzedniem jej położeniem tak, że oddzielne jej fazy zlewają się w jeden obraz nabrzmiałej ku środkowi struny (fig. 167, str. 250). O drganiu struny, podczas tego gdy wydaje ona ton, możemy także łatwo przekonać się, dotykając jej palcem: uczuwamy wtedy jej uderzenia.

Umocujmy sztabę metalową w sposób, pokazany na fig. 168, str. 251, odchylmy swobodny jej koniec w stronę, a następnie wypuśćmy go z ręki. Zobaczymy, że sztaba wykonywa szereg oscylacyj, których amplituda stopniowo się zmniejsza; jednocześnie słyszymy określony ton, coraz słabszy, który w końcu zamilka wraz z ustaniem drgań sztaby.

Pociągając brzegi klosza szklanego albo dzwonu smyczkiem skrzypcowym, słyszymy bardzo głośne tony, które również po-

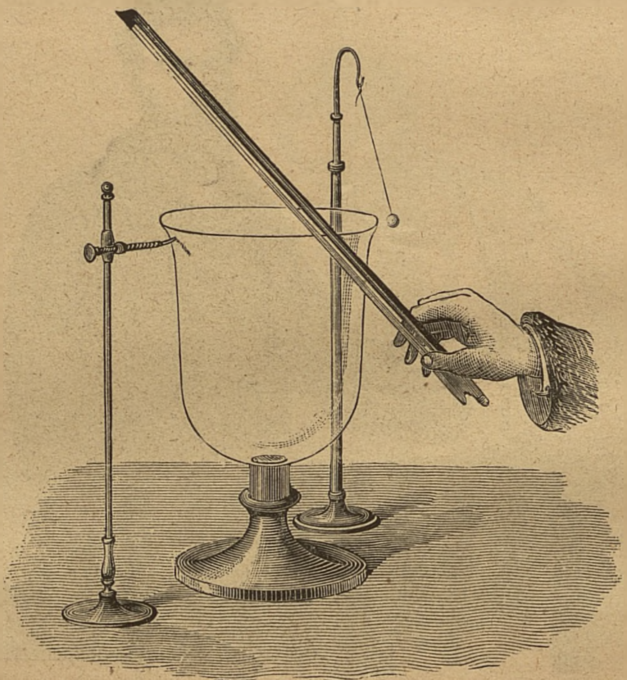


Fig. 169. Drgania klosza szklanego.

wstają wskutek drgań tych ciał, jak o tem można się przekonać za pomocą jednego z następujących sposobów: Ustawmy na bardzo nieznacznej odległości od spoczywającego jeszcze klosza ostrze, wtedy podczas dźwięczenia jego słyszymy któtkie urywane uderzenia szkła o ostrze, dające się bardzo łatwo odróżnić od tonu, wydawanego przez sam klosz (fig. 169). Albo zawieśmy na delikatnej nitce kulkę z lekkiego materyału tak, ażeby doty-

kała klosza, wtedy przez cały czas trwania wytworzonego tonu kulka będzie ciągle odrzucana przez klosz.

W tem miejscu wypada nam nieco szerzej omówić wspomniany już przedtem (str. 229) przyrząd, zwany drygawką Trevelyana. Przyrząd ten składa się z podłużnej płyty żelaznej lub mosiężnej, mającej od spodu wyżłobienie z ostremi brzegami i przymocowanej do dłuższej nieco od niej sztaby, zakończonej kulką (fig. 170). Jeżeli ogrzejemy taką drygawkę i następnie położymy ją na zaostrzonej ku górze bryle zimnego ołowiu, wtedy usłyszymy ostry ton, który trwa dopóty, dopóki temperatury obu metali się nie wyrównają. Powstanie odnośnego tonu tłómaczymy sobie w następujący sposób: Gdy drygawka jednym swym brzegiem dotyka zimnego ołowiu, wtedy metal ten w punktach ze-

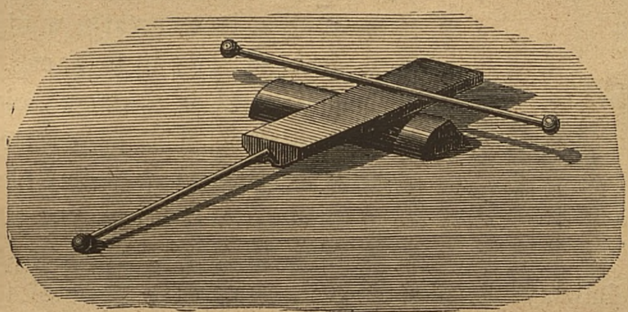


Fig. 170. Drygawka Trevelyan'a.

tknięcia raptownie się rozgrzewa, wskutek czego w tem miejscu powstaje małe wzniesienie (fig. 171, str. 254) i drygawka zostaje podrzucona do góry, tymczasem drugi jej brzeg spada na ołów, następnie zostaje podrzucony i t. d. Pchnięcia kolejno zadawane przez rozgrzewające się części ołowiu obu brzegom drygawki, wprawiają ją w szybkie drgania, które przenosząc się do naszego ucha, wywołują w niem wrażenie odpowiedniego tonu. Drgania te możemy znacznie zwolnić, umieszczając wpoprzek płyty sztabę, zakończoną kulkami (fig. 170), które oprócz tego ruchem swym uwidoczniają oscylacye całego przyrządu.

Ciecze także ulegają mniej lub więcej szybkim drganiom, gdy powstaje w nich dźwięk. Jeżeli naprzykład kielich szklany

napełnimy do połowy wodą i następnie będziemy pocierali brzeg jego smyczkiem albo zwilżonym palcem, to zobaczymy, iż powierzchnia cieczy rozdzieli się na 4 do 6 części, rozmaicie ugrupowanych, zależnie od wysokości wytwarzanego przy tem tonu. Przy dostatecznie zaś silnych dźwiękach, drgania potęgują się do tego stopnia, że woda odłącza się od powierzchni cieczy i w postaci bardzo drobnych kropel rozpryskuje się na wszystkie strony.

Nakoniec dźwięk powstaje także wskutek drgań słupa jakiegoś gazu. Jeżeli zadmiemy w piszczałkę organową za pomocą ust albo przez naciśnięcie połączonego z nią miecha, usłyszymy ton, którego wysokość, jak to później zobaczymy, zależy od rozmiarów piszczałki. Dotykając jej ścian, nie czujemy jednak żadnych uderzeń, w tym więc wypadku drga nie ciało stałe—piszczałka, lecz zawarte w niej powietrze. Łatwo to wykazać, jeżeli do piszczałki o szklanej ścianie, dozwalającej widzieć co zachodzi we wnętrzu, wprowadzimy błonę, uczepioną do nitek i obsypaną piaskiem (fig. 172, str. 255), a następnie w nią zadmiemy: ziarnka piasku żywo wtedy podskakują, zdradzając swym ruchem drgania powietrza.

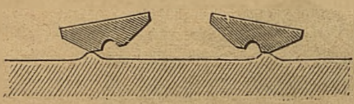


Fig. 171. Przyczyna drgań w przyrządzie Trevelyan'a.

§ 2. Rozchodzenie się dźwięku w powietrzu. Fale dźwiękowe.

Opisane w poprzednim § doświadczenia wykazują w sposób niewątpliwy, że dźwięk polega na drganiach ciała sprężystego. Sama jednak obecność takiego ciała nie wystarcza jeszcze, abyśmy otrzymali wrażenie dźwięku; do tego potrzeba nadto sprężystego środka, któryby drgania te doprowadzał do naszego ucha, wiemy bowiem, że w próżni dźwięk się nie rozchodzi. Środkiem takim zwykle jest powietrze, w którem po największej części znajduje się zarówno ciało drgające, jak i organ słuchowy. Rozważmy tedy nieco bliżej proces, zachodzący w powietrzu podczas rozprzestrzeniania się w niem dźwięku.

Ściany ciała drgającego w pewnej fazie swej oscylacyi raptownie popychają naprzód najbliższe cząstki otaczającego powietrza, te szybko udzielają swój ruch sąsiednim cząstkom, same zaś wracają do pierwotnego położenia; sąsiednie te cząstki trącają o dalsze, z kolei przechodzą w stan spoczynku i t. d. Każda z kolejnych warstw powietrza, otaczających ciało drgające, przejmuje ruch poprzedniej warstwy i przenosi go na następną i w ten sposób wstrząśnienie powstające w początku naokoło źródła dźwięku, rozchodzi się na wszystkie strony i dosięga naszego ucha. Przenoszenie się tego wstrząśnienia jest czemś odmiennem od ruchu samych cząstek powietrza, podczas bowiem gdy te ostatnie wykonywują tylko nieznaczne drgania około średniego swego położenia, wstrząśnienie przenosi się na bardzo znaczną odległość.

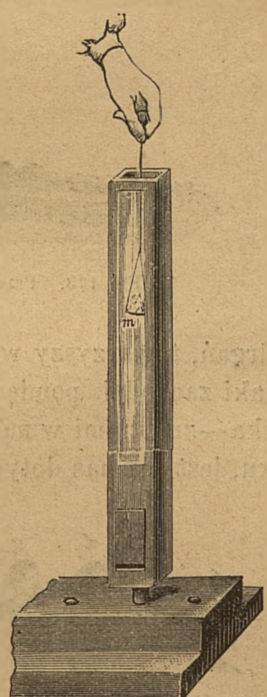


Fig. 172. Drgania słupa powietrza.

Procesu tego w powietrzu dostrzedz naturalnie nie możemy, doskonały jednak obraz zachodzącego w niem ruchu dają nam niektóre analogiczne zjawiska przenoszenia się wstrząśnienia przez szereg stykających się z sobą i dostatecznie sprężystych ciał stałych, naprzykład przez szereg kul ze szkła albo kości słoniowej. Zjawiska te opiszemy tu wymownemi słowy Tyndalla.

Ułóżmy takie kule obok siebie w odpowiedniem wyżłobieniu w ten sposób, aby wzajemnie się stykały (fig. 173, str. 256), następnie weźmy jednę z nich do ręki i potoczmy ją silnie tak, ażeby uderzyła o pierwszą z pozostałych. Wstrząśnienie, nadane w ten sposób pierwszej kuli, udziela się drugiej, ta przenosi je na trzecią, trzecia—na czwartą i t. d.; każda kula udziela swój ruch następnej, lecz sama pozostaje w miejscu; tylko ostatnia kula szeregu odskakuje. Otóż w po-

dobny sposób dźwięk od cząstki do cząstki rozprzestrzenia się w powietrzu. Cząstki powietrza, wypełniające wklęsłość ucha, uderzają w końcu o błonę bębenkową, naciągniętą wpoprzek kanału słuchowego zewnętrznego i wprawiają ją w drgania, które udzielają się zakończeniom nerwowym i wzdłuż tych ostatnich zostają przeprowadzone do mózgu. Tam wywołują pewne zmiany, którym, w razie dostatecznie wielkiej prędkości i amplitudy

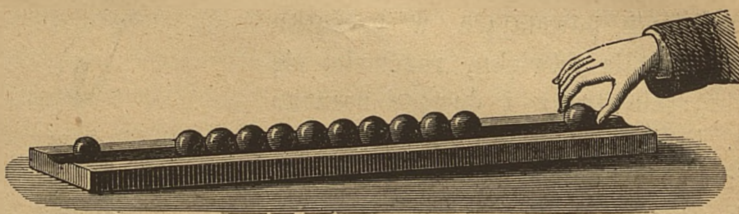


Fig. 173. Przenoszenie się ruchu przez szereg sprężystych kul.

drgań, towarzyszy wrażenie odpowiedniego dźwięku. Związek, jaki zachodzi pomiędzy fizyczną stroną tego ostatniego zjawiska—zmianami w mózgu a stroną psychiczną—wrażeniem dźwięku, jest dla nas dotychczas jeszcze zupełnie ciemny.

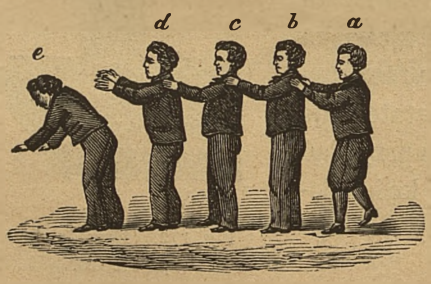


Fig. 174. Przenoszenie się ruchu przez szereg opierających się o siebie chłopców.

Sprobujmy wyświetlić proces rozprzestrzeniania się dźwięku w powietrzu za pomocą innego jeszcze bardzo zwykłego, lecz doskonale odpowiadającego celowi przykładu: Przypuśćmy, iż mamy przed sobą szereg z pięciu chłopców—*a*, *b*, *c*, *d*, *e* (fig. 174) ustawionych tak, że ręce każdego z nich spoczywają na ramionach znajdującego się przed nim sąsiada; *e* rozpoczyna, *a* zaś zamyka sobą szereg. Trąćmy nagle chłopca *a*, ten daje pchnięcie następnemu chłopcu *b*, poczem znowu zajmuje pionowe położenie, *b* pcha *c*, *c*—*d*, *d*—*e;* każdy chłopiec, dawszy pchnięcie swemu sąsiadowi, znowu się wypro-

KSIĘGARNIA NAKŁADOWA

H. OLAWSKIEGO

Mazowiecka Nr. 6,

POLECA:

HISTORYĘ NATURALNĄ

D-ra G. Hayeka,

zawierającą 72 tablic zoologicznych z 845 kolorowanemi figurami, 40 tablic botanicznych z 445 kolorowanemi figurami i 8 mineralogicznych z 75 figurami. — Cena kompletu Rs. **18**; w ozdobnej oprawie Rs. 22.

Także do nabycia (tak długo jak zapas starczy)

w 30-tu zeszytach po kopiejek **60.**

Autorowi dzieła *przyznano* na wystawie w Tryeście w r. 1882 **złoty medal** w dziale sztuk i nauk.

HISTORYĘ POWSZECHNĄ

BECKERA,

w przekładzie dopełnionym i uzupełnionym

w epoce dziejów najnowszych,

pod redakcyą **M. Wołowskiego**, w 12 tomach po Rs. **1** kop. **10** za tom (oprawne tomy zawierające po 2 tomy po Rs. **2** kop. **50**) lub w zeszytach po kop. **10.**

GEOGRAFJĘ POPULARNĄ

czyli

Ziemia w malowniczych obrazach.

Opisy najciekawszych krajów, ludów i miejscowości według najnowszych źródeł i najcelniejszych autorów, opracował

Dr. Wł. Wicherkiewicz,

z mapkami i drzeworytami, w 53-ch zeszytach po kop **15.**

Podręczniki do nauki języków obcych

(Z WYMOWĄ)

podług metody **D-ra H. Loewego.**

JĘZYK FRANCUZKI

ze słownikiem

francuzko-polskim i polsko-francuzkim,

komplet w 25 zeszytach

po 15 kop.

JĘZYK NIEMIECKI

(pod prasą)

ze słownikiem

polsko-niemieckim i niemiecko-polskim,

komplet w 25 zeszytach

po 15 kop.

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

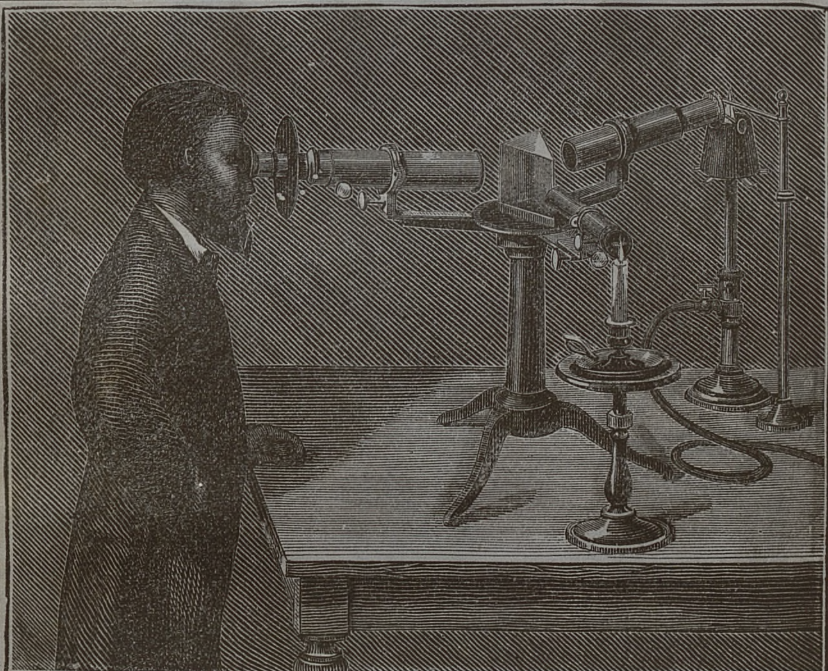
Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop. Zeszyt 9. Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

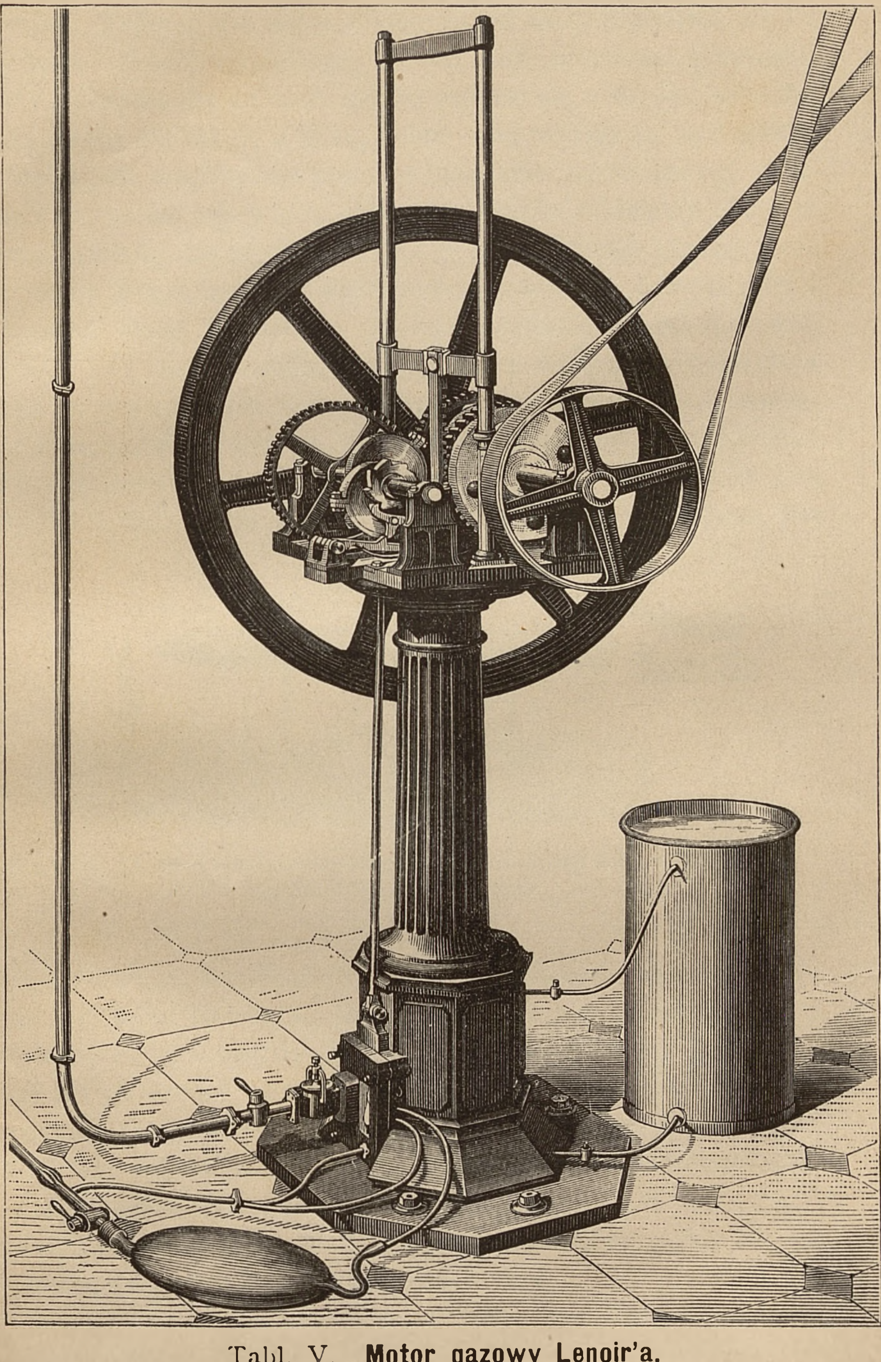
Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego,** ul. Mazowiecka № 6.

1889.



Tabl. V. **Motor gazowy Lenoir'a.**

stowuje. Tylko *e*, nie mając nikogo przed sobą, przesuwa się ku przodowi. Gdyby znajdował się on nad brzegiem przepaści, wtedy stoczyłby się do niej; gdyby opierał się o szybę - stłukłby szkło; gdyby stykał się z błoną bębna—wprawiłby ją w drgania. W ten sposób moglibyśmy przesłać pchnięcie przez szereg, składający się ze stu lub więcej chłopców; każdy oddzielny chłopiec jednak wahałby się przytem tylko w jednę i drugą stronę. Otóż tak samo przesyłamy dźwięk przez powietrze i wprawiamy w drgania błonę bębenkową jakiegoś oddalonego od nas ucha, podczas gdy każda oddzielna cząstka powietrza, przyjmująca udział w przenoszeniu wstrząśnienia, wykonywa tylko nieznaczne stosunkowo oscylacye. Że istotnie oddzielne cząstki środka przy rozprzestrzenianiu się w nim dźwięku oscylują tylko tam i napowrót, lecz nie przenoszą się z jednego miejsca na inne, nie

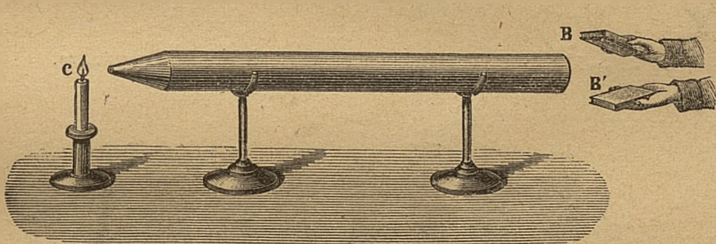


Fig. 175. Cząstki środka, przenoszącego dźwięk, nie zostają porwane, lecz tylko oscylują w jednę i drugą stronę.

zostają porwane, tego dowodzi następujące doświadczenie, podane przez Tyndalla: Skierujmy jeden stożkowato zaostrzony koniec metalowej rury, 5 metrów długiej, na płomień świecy (fig. 175), drugi zaś jej koniec napełnijmy dymem z palącego się papieru lub cygara. Gdy następnie silnie uderzymy o siebie dwie książki *B* i *B'* tak, jak to pokazuje figura, płomień zostanie zagaszony, lecz najmniejsze nawet ślady dymu nie wysuną się z końca rury, zwróconego do świecy. Wstrząśnienie przenosi się przez cząstki powietrza i dymu, nie porywając ich z sobą.

Mamy już teraz jaśniejsze pojęcie o sposobie rozprzestrzeniania się pojedyńczego uderzenia. Rozważmy teraz cały ich szereg:

niechaj widelki strojowe drgają w pobliżu otwartej z obu stron rury (fig. 176), dla ułatwienia sobie zadania weźmy nadto pod uwagę tylko jedno ich ramię a, zwrócone do rury. Gdy ramię to od skrajnego swego położenia po lewej stronie a'' oscyluje naprzód aż do a', wtedy popycha przed sobą powietrze. Gdyby to ostatnie było ciałem niesprężystem, jak naprzykład ołów albo glina, wtedy słup powietrza, znajdujący się w rurze, zostałby przytem tylko z niej wysunięty na długość, odpowiednią amplitudzie drgania widełek. Ponieważ jednak powietrze jest łatwo ściśliwe i sprężyste, przeto pod naciskiem drgającego ramienia będzie się tylko zgęszczało na pewnej przestrzeni

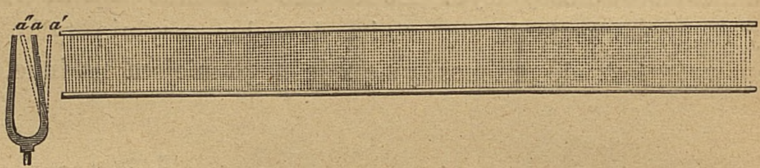


Fig. 176. Rozprzestrzenianie się dźwięku w słupie powietrza.

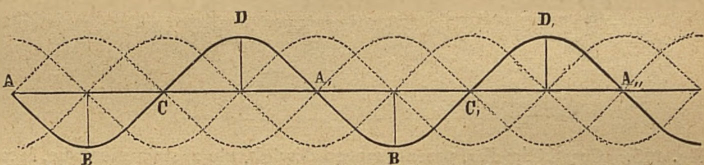


Fig. 177. Graficzne przedstawienie fal dźwiękowych.

dopóty, dopóki ramię nie dosięgnie skrajnego położenia z prawej strony a'. Zgęszczona ta warstwa wskutek sprężystości powietrza usiłuje znowu się rozszerzyć i przenosi zgęszczenie na następną warstwę powietrza; jednocześnie atoli drgające ramię rozpoczyna swój ruch wsteczny od a' do a'', pozostawiając za sobą częściową próżnię, do której wpływa rozszerzające się powietrze tak, że teraz rozrzedza się ono w początku rury. Przy następnej oscylacyi ramienia znowu otrzymamy zgęszczenie, po którem nastąpi rozrzedzenie i t. d., przyczem tak jedno, jak drugie przenosi się kolejno z warstwy na warstwę wzdłuż całej rury. Każdej całkowitej oscylacyi ciała drgającego odpowiadają więc

w rurze dwie następujące po sobie warstwy, jedna—rozrzedzonego, druga—zgęszczonego powietrza, które razem wzięte stanowią t. zw. *falę dźwiękową*, posuwającą się coraz dalej wzdłuż rury.

Stan powietrza w oddzielnych punktach rury możemy także przedstawić graficznie (geometrycznie) w następujący sposób: Na linii prostej, wyobrażającej kierunek rury, a więc i kierunek rozprzestrzeniania się fal dźwiękowych, wznosimy w punktach, w których powietrze jest zgęszczone, prostopadłe ku górze, w tych zaś, gdzie powietrze jest rozrzedzone, prowadzimy prostopadłe ku dołowi i nadajemy im długość, proporcyonalną do stopnia zgęszczenia lub rozrzedzenia w danem miejscu (fig. 177). Łącząc z sobą końcowe punkty tych prostopadłych, otrzymujemy falową linię $A\ B\ C\ D\ A_,\ B_,\ C_,\ D_,\ A_{,,}\ldots$, która swemi zagięciami ku górze lub ku dołowi unaocznia zgęszczenia i rozrzedzenia powietrza. Po pewnym czasie każde zgęszczenie i rozrzedzenie udziela się nieco naprzód; odpowiednio do tego linia falowa przyjmuje położenia, oznaczone na figurze kropkami. Długość $A\ A_,$, od początku jednego rozrzedzenia do początku następnego, albo równą jej długość $B\ B_,$—od maximum jednego rozrzedzenia do maximum następnego, albo też równą długość $C\ C_,$, lub wreszcie $D\ D_,$ nazywamy *długością fali*. Zastanawiając się nad procesem, przedstawionym na figurze 176, przekonywamy się, że w czasie, gdy ciało dźwięczące—w danym wypadku widełki strojowe—wykonywa jednę całkowitą oscylacyę, dźwięk przenosi się na długość jednej fali i że w ogóle ilość fal powstających w danym czasie jest takaż sama, co i ilość drgań ciała dźwięczącego w tymże czasie ([1]). W powyższym przykładzie przyjęliśmy, że drgania ciała dźwięczącego zachodzą według praw wahadła; w takim wypadku prędkość oscylującego naprzód ramienia począwszy od położenia a'', w którem równa się 0, ciągle wzrasta aż do położenia a, gdzie jest największa; do tej chwili ramię wykonało $^1/_4$ oscylacyi. Następnie prędkość drgania znowu się zmniejsza aż do położenia a', odpowiadającego $^1/_2$ oscylacyi, w którem staje się równą 0, poczem ramię oscyluje na-

([1]) Do punktu tego wrócimy jeszcze w następnym rozdziale.

powrót z coraz to wzrastającą prędkością aż do maximum w *a*, odpowiadającego $^3/_4$ oscylacyi; od tego zaś punktu prędkość znowu się zmniejsza i staje się równą 0 w *a''*, w końcu całej oscylacyi. Największa więc prędkość w jednę lub drugą stronę przypada w końcu $^1/_4$ i $^3/_4$ oscylacyi; w tym jednak czasie, jak widzieliśmy, dźwięk przenosi się na długość $^1/_4$, względnie $^3/_4$ fali, w tych przeto miejscach, t. j. pośrodku każdej pół-fali, cząstki powietrza drgają także z największą prędkością w jednę lub drugą stronę i tamże przypadają maxima zgęszczeń lub rozrzedzeń. Widzimy też na fig. 177, że w rzeczonych punktach prostopadłe—przedstawiające prędkość drgania cząstek powietrza, jakoteż stopień zgęszczenia lub rozrzedzenia—są najdłuższe. Jeżeli drgania ciała dźwięczącego zachodzą według innych praw, niż oscylacye wahadła, to w innych także punktach przypadają maxima zgęszczeń i rozrzedzeń.

Nazwa fal dźwiękowych pochodzi od podobieństwa, jakie przedstawiają one pod pewnym względem z *falami wodnemi*. Każdy dobrze zna te ostatnie. Gdy na spokojną powierzchnię stawu rzucimy kamień, wtedy powstaje pod nim zagłębienie, wokoło którego woda wznosi się do góry, tworząc wzniesienie, za niem powstaje dokoła zagłębienie czyli *dół*, dalej znów wzniesienie czyli *góra* i t. d. W ten sposób współśrodkowe zagłębienia i wzniesienia czyli doły i góry rozprzestrzeniają się od punktu spadku kamienia na wszystkie strony, tworząc coraz szersze pierścieniowate fale, z których każda składa się z dołu i góry, odpowiadających rozrzedzeniu i zgęszczeniu fali dźwiękowej. Stojącemu na brzegu obserwatorowi wydaje się, jakoby sama woda przepływała ku niemu od punktu, w którym spadł kamień; jestto jednak tylko złudzenie: i w tym wypadku, podobnie jak przy dźwięku, ma tylko miejsce przenoszenie się ruchu falowego, lecz nie samych cząstek drgających. Można się o tem przekonać, rzucając na falującą wodę skrawki papieru lub kawałki korka: ciała te wraz ze znajdującemi się pod niemi cząstkami wody kołyszą się tylko w górę i na dół, pozostając w miejscu, a nie przenoszą się z jednego miejsca na inne, co uczyniłyby, gdybyśmy je rzucili na płynącą wodę, naprzykład na rzekę.

Zachodzi atoli ważna różnica pomiędzy falowaniem powietrza podczas rozchodzenia się w niem dźwięku, a falowaniem wody. W pierwszym wypadku cząstki powietrza oscylują tam i napowrót w samym kierunku rozprzestrzeniania się fal dźwiękowych (w doświadczeniu naprzykład, przedstawionem na fig. 176— w kierunku rury), podczas gdy przy falowaniu wody oddzielne jej cząstki kołyszą się w górę i na dół, t. j. w kierunku pionowym, same zaś fale rozchodzą się po powierzchni wody w kierunku poziomym, a więc drgania zachodzą tu prostopadle do kierunku rozchodzenia się fal. Drgania albo falowania pierwszego rodzaju nazywamy *podłużnemi*, drugiego zaś — *poprzecznemi*. Dźwięk więc polega na *podłużnych falowaniach* powietrza, albo innego sprężystego środka. Zobaczymy w następnej księdze, że światło, przeciwnie, polega na *poprzecznych* drganiach bardzo subtelnego środka—eteru świetlnego.

§ 3. Zależność prędkości dźwięku od sprężystości i gęstości środka. ([1])

Z kolei wypada nam zająć się teraz warunkami, od jakich zależy prędkość rozprzestrzeniania się fal dźwiękowych. Zanim to jednak uczynimy, wróćmy się jeszcze raz do omówionego w poprzednim § przykładu z chłopcami (fig. 174), który ułatwi nam zrozumienie przynajmniej jednego z tych warunków. Gdy popychamy chłopca *a*, wtedy może on zwolna poddawać się wywieranemu nań naciskowi i powoli oddawać swój ruch sąsiadowi *b;* ten ostatni może to samo uczynić względem *c*, *c* względem *d*, *d* względem *e*. W ten sposób ruch może bardzo wolno przenosić się przez cały szereg. Chłopiec *a* może jednak także, przez silne natężenie mięśni i następne szybkie cofnięcie się, oddać prędko otrzymane uderzenie swemu sąsiadowi *b*, a potem spocząć, *b* może to samo uczynić z *c*, *c* z *d*, *d* z *e*. Ruch w takim razie szybko przenosi się przez cały szereg. Otóż silne to natężanie mięśni i szybkie

([1]) Przy opracowaniu tego §, jak i wielu innych ustępów niniejszej księgi, posługiwaliśmy się głównie dziełem Tyndalla „Dźwięk."

cofanie się odgrywa tu podobną rolę, co i *sprężystość* powietrza albo innego środka przy rozchodzeniu się dźwięku. Gdy przy przenoszeniu się fali dźwiękowej warstwa powietrza pchana jest ku sąsiedniej warstwie, to oddaje ona jej swój ruch, poczem sama wskutek sprężystości się cofa, i czem prędzej zachodzi to oddawanie ruchu i cofanie się, czyli innemi słowy im większa jest *sprężystość* powietrza albo w ogóle danego środka, tem prędzej rozchodzi się w nim dźwięk.

Miarę sprężystości powietrza daje nam jego ciśnienie, które, jak już wiemy, wyraża się zwykle wysokością równoważonego przez nie słupa rtęci; na poziomie morza ciśnienie to jest przeszło 2 razy większe, niż na szczycie Mont-Blanc, sprężystość powietrza jest więc w pierwszem miejscu przeszło 2 razy większa, niż w drugiem.

Co się tyczy gęstości powietrza lub też każdego innego środka, to im ona jest większa, tem wolniej rozchodzi się w nim dźwięk i naodwrót. Wszystko więc, co sprzyja spotęgowaniu sprężystości albo zmniejszeniu gęstości środka, powiększa także prędkość dźwięku; czynnikiem takim, pomiędzy innemi, jest ciepło.

Gdybyśmy mogli zwiększyć sprężystość powietrza, nie zmieniając jego gęstości, to prędkość dźwięku wzrosłaby przytem, albo gdybyśmy mogli zmniejszyć gęstość powietrza, nie zmieniając jego sprężystości, to również powiększylibyśmy prędkość dźwięku. Jak jedno tak i drugie daje się urzeczywistnić. Gdy ogrzewamy naprzykład powietrze w zamkniętym balonie tak, aby nie mogło się rozszerzać, wtedy zwiększamy ciśnienie, a więc i sprężystość tego gazu, podczas gdy gęstość jego nie ulega przytem żadnej zmianie. Przez tak ogrzewane powietrze dźwięk przenosi się szybciej, niż przez zimne. Z drugiej strony, gdy ogrzewane powietrze może się swobodnie rozszerzać, wtedy gęstość jego się zmniejsza, ciśnienie natomiast, a więc i sprężystość pozostaje bez zmiany; w takiem przeto powietrzu dźwięk również się rozchodzi prędzej, niż w zimnem. Ten ostatni wypadek ma miejsce z naszą atmosferą, gdy ją ogrzewają promienie słoneczne: powietrze wtedy swobodnie się rozszerza na wszystkie

strony, wskutek czego gęstość jego się zmniejsza, ciśnienie zaś, a więc i sprężystość się nie zmienia. Pojmujemy teraz, dlaczego, mówiąc w poprzednim rozdziale o prędkości dźwięku, zawsze uwzględnialiśmy przytem temperaturę: *przy niższej temperaturze dźwięk rozchodzi się w tym samym środku wolniej, niż przy wyższej.*

Porównajmy teraz ze sobą pod omawianym tu względem różne gazy. Przy tej samej sprężystości gęstość wodoru jest znacznie mniejsza, niż powietrza, dźwięk w pierwszym z tych gazów o wiele też prędzej się rozchodzi, niż w drugim. Przeciwnie się rzecz ma z cięższym od powietrza kwasem węglanym: podczas gdy sprężystość tego ostatniego jest ta sama, co i powietrza (przy jednakowem ciśnieniu), gęstość jego natomiast jest większa, a więc prędkość rozchodzenia się w nim dźwięku— mniejsza, niż w powietrzu. Ponieważ ciśnienie (a więc także sprężystość) i gęstość powietrza—według prawa Boyle'a-Mariotte'a, ściśle stosującego się do tego gazu—przy niezmiennej temperaturze wzrastają lub zmniejszają się w tym samym stosunku, przeto wpływy ich na prędkość dźwięku muszą się wzajemnie zobojętnić. Gdyby więc naprzykład na najwyższych szczytach alpejskich panowała ta sama temperatura, co u ujścia Wisły, t. j. na poziomie morza, wtedy i prędkość dźwięku w obu tych miejscach byłaby jednakowa; jakkolwiek bowiem sprężystość powietrza na szczycie Mont-Blanc jest prawie dwa razy mniejsza niż przy ujściu Wisły, lecz za to i gęstość powietrza w pierwszem miejscu jest dwa razy mniejsza. Ponieważ jednak powietrze w górnych warstwach atmosfery jest zimniejsze, niż w dolnych, przeto prędkość dźwięku na szczytach gór jest w rzeczywistości mniejsza, niż na poziomie morza.

Związek, zachodzący pomiędzy prędkością dźwięku a sprężystością i gęstością środka, wyrażamy następującem prawem, odkrytem przez Newtona: *Prędkość dźwięku jest wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego ze sprężystości środka i odwrotnie proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z jego gęstości.* Gdyśmy naprzykład ogrzali w zamkniętem naczyniu powietrze od 0 do 819° C., zwiększylibyśmy przez to jego ciśnienie, a więc

i sprężystość 4 razy, przyczem gęstość jego pozostałaby bez zmiany; w takiem powietrzu dźwięk rozchodziłby się 2 razy prędzej, niż w powietrzu przy 0°. Gęstości tlenu i wodoru mają się do siebie jak 16 do 1; otóż prędkość dźwięku w pierwszym z tych gazów jest, przy jednakowem ich ciśnieniu, a więc przy jednakowej sprężystości, 4 razy mniejsza, niż w drugim.

Prawu powyższemu zdaje się przeczyć znany nam już dobrze fakt, że w ciałach ciekłych i stałych, gęstszych od powietrza, dźwięk rozchodzi się prędzej, niż w tym gazie (¹). Sprzeczność ta jest jednak tylko pozorna. Jeżeli bowiem gęstość tych ciał znacznie przewyższa gęstość powietrza, to z drugiej strony sprężystość ich o wiele bardziej przewyższa sprężystość powietrza. Miarę sprężystości różnych ciał daje nam wielkość siły, mogącej wywołać w nich jednę i tę samą zmianę, a więc naprzykład siły, która sprowadza ich objętość do połowy. Otóż siła ta jest najmniejsza dla ciał lotnych, dla cieczy zaś jest bez porównania większa, niż dla tych ostatnich, a nawet niż dla ciał stałych; to samo dotyczy sprężystości. Dźwięk więc dlatego prędzej się rozchodzi w ciałach ciekłych i stałych, niż w gazach, że stosunek sprężystości do gęstości jest dla tych ciał większy, niż dla gazów, bynajmniej zaś nie dlatego, jak to częstokroć mylnie przypuszczają, że ciała te są gęstsze, niż gazy. Przeciwnie wzrost gęstości, przy innych równych warunkach, zawsze powoduje zmniejszenie prędkości dźwięku. I gdyby sprężystość wody była tylko równa sprężystości powietrza, wtedy prędkość dźwięku w wodzie zamiast być przeszło 4 razy większą, niż prędkość w powietrzu, stanowiłaby tylko drobny ułamek tej ostatniej. Należy więc w tych wypadkach uwzględnić zarówno sprężystość, jak i gęstość środka, gdyż prędkość dźwięku warunkuje się nie jedną z nich, lecz stosunkiem jednej do drugiej. Bardzo pouczający przykład wpływu małej gęstości,—przy olbrzymiej sprężystości,—na prędkość rozprzestrzeniania się fal, daje nam eter świetlny, który, jak to zobaczymy w następnej księdze, przenosi

---

(¹) Patrz tabliczkę na str. 241.

drgania światła z prędkością nie tylu i tylu metrów, lecz około 42000 mil na sekundę.

W poprzednim rozdziale opisaliśmy już *doświadczalne* metody, za pomocą których oznaczono prędkość dźwięku w powietrzu. Znając jednak sprężystość i gęstość tego gazu, możemy także na mocy powyżej wyłuszczonego prawa *teoretycznie obliczyć* rzeczoną prędkość. Newton, który pierwszy poznał właściwą naturę dźwięku, zrobił to obliczenie, otrzymał jednak przytem dla prędkości dźwięku w powietrzu przy 15° C. wartość—283 metrów na sekundę—o $^1/_6$ mniejszą od tej, którą dają bezpośrednie doświadczenia. Robiono tedy najrozmaitsze przypuszczenia czyli hypotezy co do przyczyny tej niezgodności teoryi z doświadczeniem. Sam Newton wyraził hypotezę, według której dźwięk potrzebuje pewnego czasu tylko na przeniesienie się od jednej cząstki powietrza do następnej, lecz nie wymaga żadnego czasu dla przejścia przez same te cząstki; przyjął on nadto, że tylko $^1/_6$ linii, po której przebiega dźwięk, zajęta jest przez cząstki powietrza i że resztę tej linii stanowią wolne przestrzenie międzycząstkowe. Jeżeli więc — rozumował on — dźwięk w ciągu 1 sekundy, jak to pokazują bezpośrednie doświadczenia, przebiega drogę 340 metrów, to ponieważ $^1/_6$ tej drogi, czyli w całych cyfrach 57 metrów zajęta jest przez cząstki powietrza, na przebycie których dźwięk nie potrzebuje żadnego czasu, przeto 1 sekundy użył on właściwie tylko na to, aby przejść przez wolne przestrzenie międzycząstkowe, czyli na przebycie drogi 283 metr. (340 mniej 57). W ten sposób starał się on pogodzić teoryę z doświadczeniem; genialna ta hypoteza upadła jednak, jako sprzeczna z pewnemi faktami. Usiłowano ją tedy zastąpić innemi hypotezami, lecz i te również chybiły celu i dopiero sławny matematyk francuzki Laplace zdołał wykryć właściwą przyczynę rzeczonej różnicy. Spróbujmy punkt ten, najtrudniejszy z całej teoryi dźwięku, nieco bliżej wyświetlić:

Za pomocą bardzo prostych doświadczeń, które później poznamy, można wykazać, że przy raptownem zgęszczeniu gazu wywiązuje się ciepło i że przeciwnie: przy rozrzedzeniu gazu ciepło zostaje pochłonięte; w pierwszym wypadku gaz się ogrzewa,

w drugim zaś—oziębia. Otóż gdy ciało dźwięczące oscyluje naprzód, popycha ono przed sobą cząstki otaczającego powietrza i zgęszcza najbliższą warstwę tegoż, z czego wynika, że sprężystość tej warstwy wzrasta: 1) wskutek zwiększenia jej gęstości i 2) wskutek ciepła, wywiązanego przy zgęszczeniu. Newton uwzględnił tylko zmianę sprężystości, wynikającą ze zmiany gęstości, zupełnie zaś przeoczył zwiększenie sprężystości wskutek działania ciepła, wywiązującego się przy zgęszczeniu. Jeżeli zaś wraz z Laplacem weźmiemy w rachubę obie zmiany sprężystości, wtedy prędkość dźwięku, obliczona na zasadzie teoryi, zupełnie się zgadza z prędkością, otrzymaną na drodze doświadczalnej.

Możemy tu jednak łatwo popaść w błąd, jeżeli nie zachowamy pewnych ostrożności. Umysł nasz musi przy badaniu przyrody ciągle mieć się na baczności, aby uwzględnić wszystkie warunki; w przeciwnym razie wkrótce przekonywamy się, że wnioski nasze nie zgadzają się z faktami. Należy dokładnie sobie uprzytomnić, że przyrost prędkości dźwięku, wywołany przez zmianę temperatury samej fali dźwiękowej, jest zupełnie różny od zwiększenia prędkości, które powstaje wskutek ogrzania całej masy powietrza. Przeciętna temperatura powietrza nie ulega żadnej zmianie wskutek samego rozchodzenia się w niem fal dźwiękowych: nie możemy bowiem wytworzyć zgęszczonej półfali bez odpowiadającej jej rozrzedzonej pół-fali, o ile zaś temperatura pierwszej się podnosi, o tyle też temperatura drugiej spada. Otóż przypuśćmy, że masa powietrza na pewnej przestrzeni składa się już z takich zgęszczonych i rozrzedzonych warstw o różnej temperaturze; jeżeli teraz przybywający z zewnątrz dźwięk przenosi się przez taką masę powietrza, to w zgęszczonych warstwach zostaje on o tyleż przyśpieszony, o ile w rozrzedzonych — zwolniony, przeciętna jego prędkość nie mogłaby tedy się zmienić wskutek takiego rozmieszczenia temperatur.

Jeżeli jednak tak jest, to zkądże pochodzi zaznaczony przez Laplace'a przyrost prędkości dźwięku? Prosimy usilnie czytelnika, aby ze skupioną uwagą śledził podane niżej wyjaśnienie tego zawiłego nieco punktu.

Gdy ściskamy powietrze, wtedy objętość jego się zmniejsza; przeciwnie przy zmniejszeniu zewnętrznego ciśnienia powietrze się rozszerza i powiększa swą objętość. Siła, która opiera się ciśnieniu i powoduje rozszerzenie, jestto siła sprężystości, albo krócej sprężystość powietrza. Tak tedy zewnętrzne ciśnienie stara się zbliżyć do siebie cząstki powietrza, ich własna zaś sprężystość usiłuje je oddalić od siebie i cząstki są w równowadze, gdy obie te przeciwdziałające sobie siły (zewnętrzne ciśnienie i sprężystość gazu) są równe. Wskutek tego zewnętrzne ciśnienie daje nam miarę sprężystości powietrza.

Niechaj teraz środkowy z trzech szeregów punktów, nakreślonych na figurze 178, przedstawia szereg cząstek powietrza od *a* do *x*, znajdujących się w równowadze. Jeżeli której-

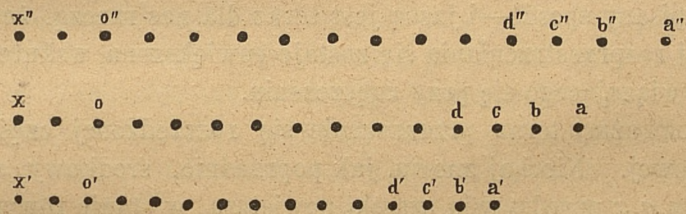


Fig. 178. Przenoszenie się zgęszczeń i rozrzedżeń fal dźwiękowych.

kolwiek z nich nadamy jakiś ruch, to przeniesie się on, wskutek sprężystości istniejącej pomiędzy cząstkami, na cały ich szereg. Przypuśćmy, że cząstka *a* została popchnięta przez ramię widełek strojowych w kierunku do *x* tak, że w końcu zajmie ona położenie *a′* w ostatnim szeregu punktów. Z chwilą rozpoczęcia oscylacyi przez cząstkę *a*, ruch jej zaczyna się przenosić na cząstkę *b*, ta w następnej chwili oddaje swój ruch *c*, *c*—*d*, *d*—*e* i t. d. tak, że w chwili, gdy cząstka *a* zajmie położenie *a′*, ruch zostaje przeniesiony po linii cząstek aż do punktu *o′*, mniej lub więcej oddalonego od *a′*. Cały szereg cząstek od *a′* do *o′* znajduje się wtedy w stanie zgęszczenia. Odległość *a′ o′*, na jaką przenosi się ruch w ciągu oscylowania cząstki *a* do położenia *a′*, zależy od stopnia sprężystości, istniejącej między cząstkami. Zwróćmy naszą uwagę na dwie dowolne cząstki *a* i *b*. Możemy sobie elasty-

czność pomiędzy niemi przedstawić jako sprężynę i jasną jest rzeczą, że im słabsza jest ta sprężyna, tem wolniej przenosi się ruch od *a* do *b*, im zaś silniej jest naprężona, tem szybciej następuje przeniesienie ruchu. To samo stosuje się do każdej innej pary cząstek między *a* i *o*. Otóż rzeczona sprężyna zostaje silniej naprężana przez cieplo, wywiązujące się przy zgęszczeniu, albo, jeżeli odrzucimy porównanie, sprężystość powietrza zwiększa się wskutek ciepła, przez co wzrasta także prędkość rozprzestrzeniania się w niem zgęszczeń fal dźwiękowych. Zachodzi tu coś podobnego, jak gdyby w opisanym przedtem przykładzie z szeregiem chłopców, siła mięśni w ramieniu każdego z nich wzrastała wskutek tego, że oddaje on uderzenie swemu sąsiadowi i jak gdyby czyniło go to zdolniejszym do szybszego przenoszenia uderzenia. Zgęszczona część fali dźwiękowej przenosi się w opisany sposób—i jasną jest teraz dla nas rzeczą, że prędkość jej rozprzestrzeniania się zostaje powiększona wskutek ciepła, wywiązującego się przy zgęszczeniu.

Rozważmy teraz przenoszenie się rozrzedzonej części fali dźwiękowej. Niechaj znowu, jak poprzednio, środkowy szereg punktów *a x* przedstawia cząstki powietrza w stanie równowagi, przy ciśnieniu 1 atmosfery. Przypuśćmy, że cząstka *a* nagle zostaje pociągnięta na prawo tak, że w końcu zajmuje ona położenie a'' w górnym szeregu punktów; za a'' podąża bezpośrednio *b*, za b''—*c*, za c''—*d* i t. d. tak, że w chwili, gdy cząstka *a* właśnie skończyła swą oscylacyę na prawo, rozrzedzenie przeniosło się wzdłuż linii a'' x'' aż do punktu o''. Dlaczego cząstka *b* podąża za a'', gdy ta ostatnia zostaje od niej odciągnięta? Oczywiście dlatego, że siła sprężystości między *b* i a'' jest słabsza, niż między *b* i *c*. W samej rzeczy: *b* zostaje pociągnięta za a'' przez siłę, równą różnicy sprężystości między a'' i *b* i między *b* i *c*. To samo stosuje się do ruchu cząstki *c* ku b'', *d* ku c'' i w ogóle do ruchu każdej następnej cząstki, podążającej za swą prawą sąsiadką. Im większa jest różnica sprężystości po obu stronach każdej cząstki, tem prędzej podąża ona za swą poprzedniczką. Teraz pojmujemy, jak działa obniżanie się temperatury, zachodzące przy rozrzedzeniu: Do zmniejszenia

sprężystości między cząstką *a* i *b* wskutek odsunięcia się pierwszej na większą odległość przyłącza się jeszcze zmniejszenie sprężystości wskutek spadku temperatury. Ubytek ciepła powiększa różnicę sprężystości, na której to różnicy polega właśnie przenoszenie się rozrzedzeń.

Widzimy tedy, że z jednej strony ciepło, wytwarzające się przy zgęszczeniu powietrza powiększa prędkość rozprzestrzeniania się zgęszczeń fal dźwiękowych i że z drugiej strony ubytek ciepła, powstający przy rozrzedzeniu, powiększa prędkość rozchodzenia się rozrzedzeń fal dźwiękowych. I przeciętna więc prędkość całej fali dźwiękowej, składającej się ze zgęszczonej i rozrzedzonej warstwy powietrza, musi się zwiększyć wskutek wzrostu i ubytku ciepła, powstającego przy jej rozprzestrzenianiu się.

Przy teoretycznem więc obliczeniu prędkości dźwięku w powietrzu należy koniecznie uwzględnić zwiększenie tej prędkości, wynikające z powyżej wyłuszczonych przyczyn. Aby zobaczyć jak to się czyni, zboczmy na chwilę od naszego przedmiotu i podajmy już w tem miejscu niektóre określenia z zakresu ciepła, o których później obszerniej pomówimy: Ilość ciepła, potrzebną do ogrzania od 0° do 1° C. jednostki wagowej (kilograma lub grama) powietrza, znajdującego się w zamkniętem naczyniu— przyczem gaz nie może się rozszerzać — nazywamy *ciepłem właściwem powietrza przy stałej objętości.* Ilość zaś ciepła, potrzebną do ogrzania od 0° do 1° C. takiejże jednostki wagowej powietrza, mogącego się swobodnie rozszerzać,—przyczem ciśnienie jego się nie zmienia—nazywamy *ciepłem właściwem powietrza przy stałem ciśnieniu.* Ta ostatnia ilość jest większa od poprzedniej; stosunek ciepła właściwego powietrza przy stałem ciśnieniu do jego ciepła właściwego przy stałej objętości równa się 1,42. Otóż Laplace wykazał, że dla uwzględnienia wzrostu prędkości dźwięku wskutek zmian temperatury, jakie powstają przy zgęszczeniu i rozrzedzeniu, należy wartość, otrzymaną przez Newtona, pomnożyć przez pierwiastek kwadratowy z liczby 1,42, wyrażającej rzeczony stosunek: otrzymujemy wtedy dla prędkości dźwięku wartość taką samą, jaką dają bezpośrednie doświadczenia. Znając prędkość dźwięku w danym gazie, jego spręży-

stość i gęstość, możemy więc, na mocy powyższego, obliczyć stosunek jego ciepła właśc. przy stałem ciśnieniu do ciepła właśc. przy stałej objętości i naodwrót: znając ten ostatni stosunek oraz sprężystość i gęstość gazu, możemy z góry obliczyć, z jaką prędkością rozchodzi się w nim dźwięk. W ten sposób prawo Newtona, uzupełnione przez Laplace'a, ustala związek pomiędzy tak odmiennemi zjawiskami, jak przenoszenie się dźwięku i ogrzewanie się gazów.

Prędkość dźwięku w cieczach można obliczyć na podstawie powyżej wyłuszczonego prawa Newtona, bez uwzględnienia poprawki Laplace'a dlatego, że zmiany temperatury, spowodowane przez przenoszenie się fal dźwiękowych, są tu tak nieznaczne, iż wywierają nader mały wpływ na prędkość dźwięku. Wartości, obliczone według tego prawa dla prędkości dźwięku w wodzie, dobrze się zgadzają z rezultatami, otrzymanemi na drodze doświadczalnej przez Colladona i Sturma, o których mówiliśmy już w poprzednim rozdziale (patrz str. 240). I tu znowu, znając prędkość dźwięku w danej cieczy oraz jej gęstość, możemy jak wyżej, na zasadzie rzeczonego prawa, obliczyć jej sprężystość i naodwrót.

Ponieważ dla ciał stałych, podobnie jak i dla cieczy, stosunek sprężystości do ich gęstości jest większy, niż dla gazów, przeto dźwięk w tych pierwszych również prędzej się rozchodzi, niż w ostatnich, jak to potwierdzają także doświadczenia, omówione w poprzednim rozdziale (patrz str. 233).

§ 4. Natężenie dźwięku.

Zobaczmy teraz, od czego zależy natężenie czyli siła dźwięku. Działanie mechaniczne kuli, uderzającej o tarczę, zależy od dwóch warunków: od jej masy i od jej prędkości; jest ono, jak to się dowodzi w mechanice, wprost proporcyonalne do masy kuli i do *kwadratu* z jej prędkości; ta sama kula, poruszając się z 2, 3, 4 i t. d. razy większą prędkością, wywiera 4, 9, 16 i t. d. silniejszy skutek. Otóż to samo dotyczy cząstek powietrza, uderzających o błonę bębenkową ucha. Rozważmy taką cząstkę,

gdy przyjmuje udział w przenoszeniu dźwięku: porusza się ona naprzód z początku z wzrastającą, później zaś ze zmniejszającą się prędkością (patrz str. 260). Sile, popychającej ją naprzód, opiera się sprężystość powietrza, która w końcu zatrzymuje cząstkę i zmusza ją do cofnięcia się. W pewnym punkcie oscylacyi naprzód, mianowicie w polowie drogi (patrz str. 260) prędkość ta dosięga maximum. Otóż *natężenie dźwięku jest wprost*

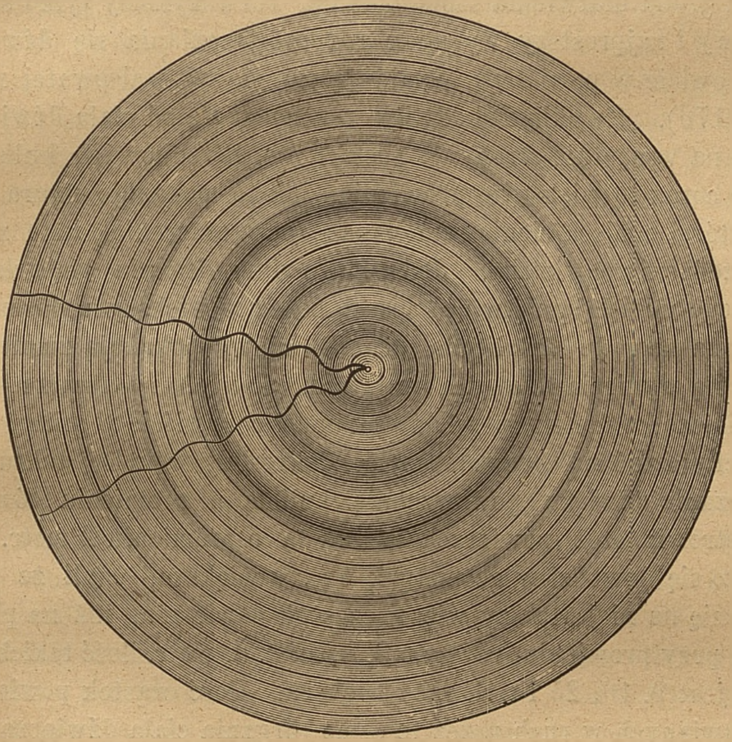


Fig. 179. Rozchodzenie się fal dźwiękowych w otwartem powietrzu.

proporcyonalne do kwadratu z tej maximalnej prędkości. Działanie dźwięku podlega temu samemu prawu, co i działanie mechaniczne wyrzuconej z lufy kuli.

Droga, jaką przebywa drgająca cząstka powietrza od jednego swego skrajnego położenia do drugiego, nazywa się, podobnie jak przy wahadle, amplitudą drgania. Otóż *natężenie*

dźwięku jest wprost proporcyonalne do kwadratu z amplitudy drgania; jest ono również wprost proporcyonalne do kwadratu z amplitudy drgania ciała dźwięczącego. Struna naprzykład, oscylująca z amplitudą 1 centymetra, usiłuje wywołać dźwięk 4 razy silniejszy od tego, jaki powstaje przy amplitudzie równej $1/2$ cent.

Zbadajmy obecnie związek, zachodzący pomiędzy natężeniem dźwięku a odległością od ciała dźwięczącego. W poprzednim §, dla ułatwienia sobie zadania, rozważyliśmy tylko szczegółowy i najprostszy wypadek rozprzestrzeniania się dźwięku, mianowicie w powietrzu, znajdującem się w walcowatej rurze (fig. 176). Zwykle zaś dźwięk rozchodzi się od ciała dźwięczącego na wszystkie strony w postaci współśrodkowych kulistych fal o coraz to większym promieniu, jak to pokazuje figura 179, na której miejsca cieniowane oznaczają zgęszczenia, inne zaś— rozrzedzenia powietrza. Jednakowo silne drgania ciała dźwięczącego udzielają się w ten sposób coraz to większym masom powietrza tak, że amplituda drgań—jak to pokazują zmniejszające się wygięcia falowych linij, nakreślonych na figurze — się zmniejsza, wskutek czego dźwięk musi oczywiście w miarę odległości stawać się coraz słabszym. Zakreślmy wokoło punktu wytwarzania dźwięku powierzchnię kulistą o promieniu równym 1 metrowi; otóż powierzchnia kulista o promieniu 2 metr. jest, jak to się dowodzi w geometryi, 4 razy większa, czyli że znajduje się na niej 4 razy więcej cząstek powietrza, niż na pierwszej; przy promieniu, równym 3, 4, 5 i t. d. metr. ilość takich cząstek jest 9, 16, 25 i t. d. razy większa. Ilość cząstek powietrza, wprawianych w ruch przez te same drgania ciała dźwięczącego, wzrasta tedy wprost proporcyonalnie do kwadratu z odległości od tego ostatniego; w tym samym stosunku zmniejsza się także natężenie dźwięku. Wyrażamy odnośne prawo mówiąc, że *natężenie dźwięku zmienia się odwrotnie proporcyonalnie do kwadratu z odległości od ciała dźwięczącego.* Zobaczymy w następnej księdze, że natężenie światła zmienia się według tego samego prawa.

Gdy dźwięk rozchodzi się nie w otwartem powietrzu, lecz w ograniczonej przestrzeni, wtedy przenosi się on na wielką odległość bez znacznego osłabienia, jak to naprzykład się dzieje,

gdy przesyłamy falę dźwiękową przez walcowatą rurę z gładką wewnętrzną powierzchnią. Znakomity uczony francuzki Biot obserwował rozprzestrzenianie się dźwięku w próżnych wodociągowych rurach miasta Paryża i przekonał się, że mógł przytłumionym głosem rozmawiać ze swym pomocnikiem przez żelazną rurę na 3000 metrów długą. Najcichszy szept był jeszcze wyraźnie słyszany na tej odległości, wstrząśnienie zaś, wynikające z wystrzału pistoletowego, danego na jednym końcu rury, gasiło palącą się świecę, umieszczoną na drugim jej końcu. Później Regnault wykonał szereg doświadczeń nad rozchodzeniem się dźwięku w walcowatych rurach, przyczem okazało się, że zarówno natężenie, jak i prędkość dźwięku zmniejszają się w miarę odległości od ciała dźwięczącego i to tem prędzej, im mniejsza jest średnica rury. Należy to przypisać. jak się zdaje, tarciu jednych warstw powietrza o inne i o ściany rury, jakoteż częściowemu pochłanianiu dźwięku przez te ściany.

Natężenie dźwięku zależy tylko od gęstości środka w punkcie wytwarzania dźwięku, nie zaś od gęstości środka w punkcie, w którym go słyszymy. Obserwator naprzykład, stojący na szczycie Mont-Blanc, słyszy wystrzał armatni w dolinie Chamouni; nie słyszałby go zaś, gdyby przeciwnie—z takiejż armaty strzelano na szczycie góry, a on sam znajdował się w rzeczonej dolinie. W tej ostatniej powietrze jest prawie 2 razy gęstsze, niż na szczycie Mont-Blanc. W ogóle natężenie dźwięku wzrasta wraz z gęstością środka w miejscu wytwarzania dźwięku. Jeżeli naprzykład z pod klosza maszyny pneumatycznej, pod którym znajduje się mechanizm zegarowy—patrz doświadczenie, przedstawione na figurze 157—wypompujemy powietrze i zastąpimy je wodorem o takiem samem ciśnieniu, wtedy słabiej będziemy słyszeli dźwięk. Przeciwnie, przy zastąpieniu powietrza gęstszym odeń kwasem węglanym o takiem samem ciśnieniu, dźwięk donośniej będzie się rozlegał. We wszystkich jednak 3-ch wypadkach środek (powietrze), otaczający nasze ucho, posiada tę samą gęstość.

ROZDZIAŁ III.

Tony.

§ 1. Wysokość tonu. Granice słuchu. Długość fal dźwiękowych. Zasada Doepplera.

Ze wszystkich dźwięków najważniejszemi są dla nas *tony*, któremi też odtąd głównie w tej księdze zajmować się będziemy. Trudno powiedzieć, czem się różni wrażenie tonu od wrażenia każdego innego dźwięku; wszyscy jednak dobrze znamy z doświadczenia tę różnicę: Wstrząśnijmy naprzykład pudełkiem, w którem znajdują się gwoździe, młotek, piły i tym podobne przedmioty, a usłyszymy *hałas* ([1]); pociągnijmy natomiast smyczkiem wyprężoną strunę, a otrzymamy *ton*. Co się tyczy fizycznej różnicy pomiędzy temi zjawiskami, to hałas powstaje wskutek nierównych i nieregularnych drgań, podczas gdy ton zostaje wywołany przez drgania prawidłowe, dostatecznie szybkie i następujące po sobie w równych odstępach czasu.

Dlaczegóż jednak nie słyszymy oddzielnych drgań ciała dźwięczącego? Pochodzi to wskutek znanej nam już właściwości ucha, które zachowuje przez pewien czas doznane wrażenie. Przedstawmy sobie szereg uderzeń o błonę bębenkową, następujących po sobie w równych odstępach czasu; błona przy każdem uderzeniu ulega wstrząśnieniu, które ostatecznie przenosi na nerw słuchowy. Ruch ten ustaje wprawdzie bardzo prędko, lecz nie natychmiastowo; w razie więc, gdy ruch, nadany nerwowi słuchowemu przez pojedyńcze uderzenie, trwa aż do nastąpienia nowego uderzenia, to wrażenie dźwięku wcale nie ustaje i oddzielne impulsy zlewają się w jeden ciągły ton. Dla powstania muzykalnego tonu koniecznie potrzeba, ażeby fale dźwiękowe następowały po sobie w równych odstępach czasu, przyczem obojętną jest rzeczą, z jakiego źródła one pochodzą; jeżeli tylko powyższy warunek jest spełniony, to otrzymujemy muzykalny ton.

([1]) Każdy dźwięk, wyjąwszy ton, nazywamy hałasem.

Gdybyśmy np. powiększyli liczbę uderzeń zegarka aż do 100 na sekundę, to utraciłyby one dla nas swą indywidualność i zlałyby się w jeden muzykalny ton; albo gdyby uderzenia skrzydeł gołębia zachodziły z rzeczoną prędkością, to lot tego ptaka przez powietrze byłby połączony z muzyką i t. d.

Tony różnią się pomiędzy sobą pewnemi cechami, z których najważniejsza, tak pod względem fizycznym jak i muzykalnym, jest *wysokość tonu*. Zobaczymy wkrótce, od czego zależy ta ostatnia; jak zaś tony rozmaitej wysokości różnią się dla naszego ucha, tego tak samo niepodobna opisać słowami, jak naprzykład różnicę pomiędzy barwą czerwoną a zieloną. Drugą cechą, odróżniającą tony, jest ich *natężenie* czyli siła; jeden i ten sam ton może brzmieć silniej lub słabiej, nie zmieniając przytem swej wysokości; natężenie tonu (jak każdego w ogóle dźwięku) zależy tylko od amplitudy drgań, jest ono, jak widzieliśmy w końcu poprzedniego rozdziału, wprost proporcyonalne do kwadratu z tej amplitudy. Nareszcie tony różnią się jeszcze pomiędzy sobą *kolorytem* czyli *brzmieniem* (timbre): jeden i sam ton może być wydawany jednakowo silnie przez klarnet, skrzypce lub głos ludzki, a jednak w każdym z tych wypadków brzmi on inaczej dla ucha które łatwo może odróżnić, od jakiego instrumentu pochodzi dany ton.

Przyczynę rozmaitego brzmienia jednego i tego samego tonu, wydawanego przez różne instrumenty muzyczne, będziemy mogli wykazać dopiero później; o natężeniu tonu obszernie już mówiliśmy w końcu poprzedniego rozdziału, tutaj więc pozostaje nam jeszcze głębiej rozważyć pytanie, od czego zależy wysokość tonu. Bardzo proste doświadczenia odpowiedzą nam na to pytanie.

Galileusz wytwarzał muzykalny ton przez przesuwanie noża wokoło brzegów starego piastra: drobne zazębienia monety wprawiały nóż w dostatecznie szybkie i regularne drgania. Zauważył on przytem, że moneta o licznych zazębieniach wydaje ton wyższy, niż o małej liczbie zazębień, z czego wyprowadził wniosek, że wysokość tonu zależy od szybkości uderzeń. Daleko łatwiej wytwarzamy ton przez uderzenia, gdy stykamy brzeg

karty z obracającem się szybko kołem zębatem. Doświadczenie takie po raz pierwszy wykonane zostało przez sławnego współcześnika Newtona—Roberta Hooka, w nowszych zaś czasach Savart użył tego sposobu do oznaczania ilości drgań w ciągu 1 sekundy, czyli *częstości drgań*, odpowiadających tonowi pewnej wysokości. Rzeczone doświadczenie w nieco uproszczonej formie możemy powtórzyć za pomocą przyrządu, zwanego *gyroskopem*. Zasadniczą jego część stanowi ciężki mosiężny pierścień *d*, otaczający krążek, osadzony na poziomo umieszczonej stalowej osi (fig. 180). Jeżeli wokoło tej ostatniej okręcimy grubą nitkę, a następnie silnie ją wyciągniemy, jak to się robi przy puszczaniu bąka, to pierścień, a wraz z nim małe koło zębate *w* zostają wprawione w szybki ruch obrotowy. Dotykając zębów tego koła brzegiem karty, otrzymujemy bardzo wysoki ton, który z biegiem czasu staje się jednak coraz niższy, a to w miarę zmniejszania prędkości obrotu koła zębatego; w końcu zaś, przy bardzo wolnem obracaniu się koła, słyszymy już oddzielne uderzenia jego zębów o kartę. Proste to doświadczenie pokazuje nam, że *wysokość tonu zależy od szybkości, z jaką następują po sobie drgania*; im częściej zęby koła uderzają o przyciskaną do nich kartę, tem wyższy jest ton i naodwrót.

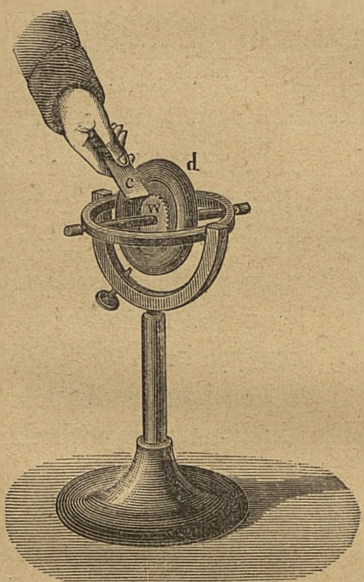


Fig. 180. Wytwarzanie tonu za pomocą gyroskopu.

Ton powstaje także wskutek szybkich zgęszczeń powietrza, następujących po sobie w równych odstępach czasu, jak to pierwszy wykazał Robison, używszy do tego celu pierwotnej formy przyrządu, który wkrótce bliżej poznamy pod nazwą *syreny*. Powtórzmy odnośne doświadczenie w nieco zmienionej formie, nadanej mu przez Seebecka (fig. 181). Krążek tektu-

rowy lub metalowy *A B*, opatrzony wokoło szeregiem jednakowo odległych otworów, jest połączony sznurem *o r* z maszyną odśrodkową, za pomocą której możemy go wprawić w mniej lub więcej szybki ruch obrotowy. Po nad krążkiem znajduje się rurka szklana *m*, komunikująca z miechem (na rysunku niewidocznym). Figura przedstawia krążek w stanie spoczynku, dolny otwór rurki *m* znajduje się w tej chwili nad jednym z jego otworów; gdy więc naciśniemy miech, prąd powietrza przejdzie przez rurkę *m* i znajdujący się pod nią w danej chwili otwór krążka, przy nieznacznem zaś obróceniu tego ostatniego, nieprzedziurawiona jego część znajdzie się pod rurką i prąd powietrza zostanie przerwany. Wskutek jednostajnego obracania się krążka, otwory kolejno i w równych odstępach czasu podchodzą pod rurkę, za każdym też razem przez odnośny otwór przepływa prąd powietrza. W ten sposób otaczające powietrze zostaje wprawione w równomierne drgania, które, w razie dostatecznej szybkości obrotu krążka, jednoczą się w muzykalny ton. Otóż łatwo się przekonać, że wysokość tego tonu wzrasta wraz z szybkością obrotu krążka, a więc *wzrasta z liczbą drgań w ciągu sekundy czyli wraz z częstością drgań*. Możemy nawet łatwo obliczyć ilość drgań, odpowiadającą danemu tonowi: niechaj naprzykład krążek posiada 20 otworów i niechaj czyni 15 obrotów na sekundę; wtedy prąd powietrza 300 razy w ciągu sekundy przepływa przez otwory i tyleż razy zostaje przerwany; powstającemu przy tem tonowi odpowiada więc 300 drgań na sekundę.

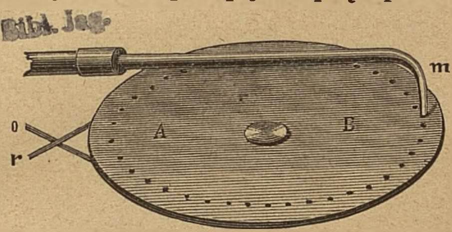


Fig. 181. Wytwarzanie tonu za pomocą równomiernie przerywanego prądu powietrza.

Gdybyśmy, zamiast jednej, wzięli kilka rurek tak, aby koniec każdej z nich przypadał po nad jednym z otworów spoczywającego krążka, wtedy wysokość tonu, przy jednakowej prędkości obrotu od tego by się nie zmieniła; natężenie natomiast tego tonu wskutek jednoczesnego działania kilku prądów, znacznie by wzrosło. Powiększenie liczby rurek wzmacnia więc

tylko odnośny ton, nie zmieniając jego wysokości. Takie wzmocnione tony wydaje syrena Seebecka (fig. 182), składająca się z krążka, opatrzonego kilkoma współśrodkowemi szeregami otworów i wprawianego w jednostajny ruch obrotowy za pomocą odpowiedniego mechanizmu. Przed krążkiem umieszczone są liczne rurki, których końce dowolnie mogą być skierowywane na otwory któregobądź z szeregów, albo też zupełnie odsunięte (w tym ostatnim wypadku znajdują się naprzykład dwie dolne

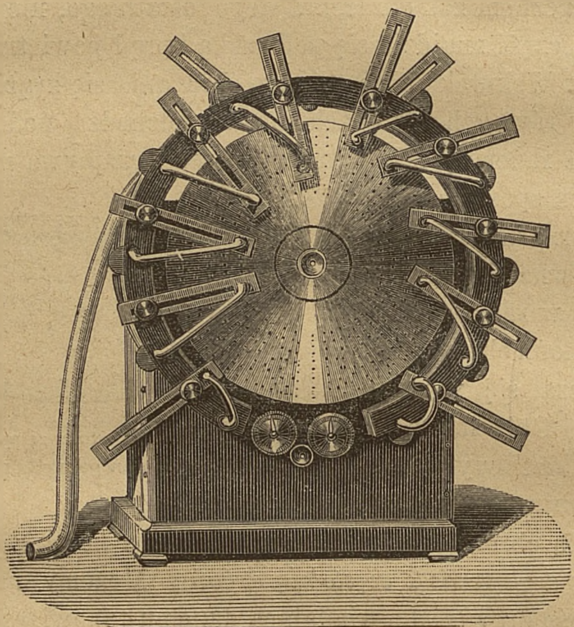
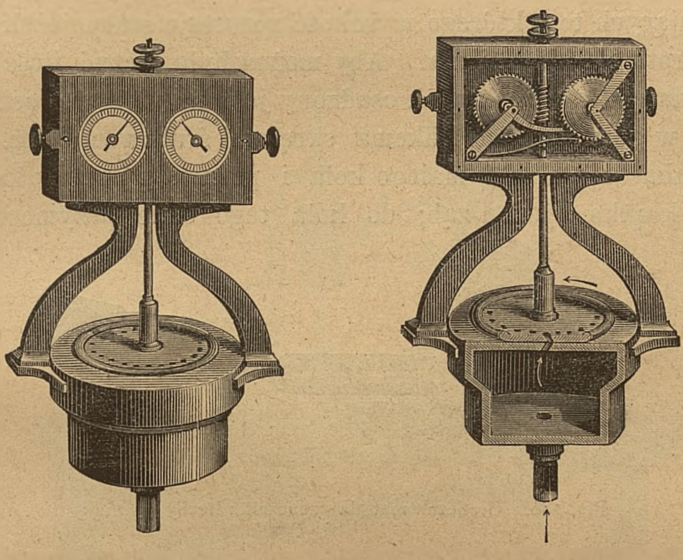


Fig. 182. Syrena Seebecka.

rurki, jedna po prawej, druga—po lewej stronie figury). Wszystkie te rurki komunikują z jedną wspólną szeroką rurą, połączoną ze skrzynią miechów organowych, które dozwalają przesyłać silny prąd powietrza jednocześnie przez wszystkie szeregi otworów obracającego się krążka. W ten sposób otrzymujemy jednocześnie kilka tonów i oczywistą jest rzeczą, że odpowiadające im częstości drgań są do siebie w tym samym stosunku, co i liczby otworów w odnośnych szeregach. Za pomocą tej syreny

możemy, pomiędzy innemi, wytwarzać różne akordy i dowolnie zmieniać natężenie każdego z ich składowych tonów, a to przez skierowywanie większej lub mniejszej liczby rurek na odnośny szereg otworów.

Najodpowiedniejszym przyrządem do obliczania częstości drgań różnych tonów jest syrena Cagnard-Latour'a (fig. 183 i 184). Składa się ona z walcowatego pudła, komunikującego



Figury 183 i 184. Syrena Cagnard—Latour'a: wygląd zewnętrzny (183) i przekrój pionowy (184).

za pomocą rury ze skrzynią miechów organowych i którego pokrywa opatrzona jest ukośnie wyciętemi i jednakowo odległemi od siebie otworami, na okręgu koła. Bezpośrednio nad tą pokrywą znajduje się ruchomy krążek z taką samą liczbą otworów, wyciętych również ukośnie, lecz w kierunku przeciwnym kierunkowi otworów pokrywy tak, jak to pokazuje fig. 185. Wskutek takiego urządzenia powietrze, wpędzone za pomocą miechów do pudła, wychodząc przez otwory pokrywy, uderza o ściany otworów krążka i wprawia go w ruch obrotowy, tem szybszy, im silniejszy

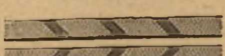


Fig. 185. Układ otworów w syrenie Cagnard—Latour'a.

jest prąd powietrza. Strzałki na fig. 184 pokazują kierunek prądu powietrza i obrotu krążka. Powietrze wychodzi swobodnie z pudła na zewnątrz za każdym razem, gdy otwory obracającego się krążka znajdują się ponad otworami pokrywy, zostaje zaś wstrzymane, gdy nad temi ostatniemi otworami znajdują się nieprzedziurawione części krążka. Przy każdym więc obrocie krążka powietrze doznaje tylu uderzeń, ile posiada on otworów; uderzenia te rozprzestrzeniają się w postaci fal dźwiękowych, wywołujących ton, którego wysokość pozostaje stałą, jeżeli prędkość obrotu się nie zmienia. Aby można było liczyć ilość obrotów w danym czasie, krążek osadzony jest na pionowej osi, opatrzonej w górnej części kilkoma skrętami śrubowemi (fig. 184), które zahaczają o zęby małego koła i posuwają je przy każdym obrocie krążka o jeden ząb; do koła tego stale przymocowana

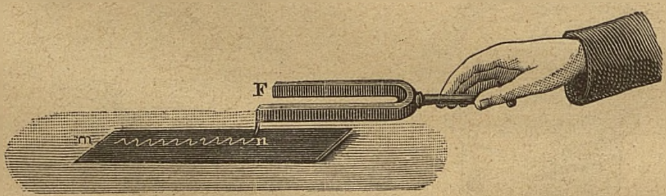


Fig. 186. Graficzna metoda oznaczania liczby drgań.

jest wskazówka, posuwająca się po cyferblacie, podzielonym na tyleż części, ile koło ma zębów. Koło to za pomocą bocznego pręcika zahacza o zęby drugiego koła, połączonego ze wskazówką i posuwa je przy każdym swym obrocie również o jeden ząb. Jeżeli więc pierwsze koło posiada naprzykład 100 zębów, to wskazówka drugiego koła zaznacza na odnośnym cyferblacie setki obrotów krążka. Za pomocą sprężyn, umieszczonych z obu stron przyrządu, można dowoli oba koła zębate odsuwać od osi, albo też zbliżać do niej.

Przypuśćmy, iż za pomocą opisanego przyrządu mamy oznaczyć częstość drgań, odpowiadającą tonowi, wytwarzanemu przez dane widełki strojowe; niechaj przytem krążek syreny posiada 16 otworów, koło zaś, którego wskazówka notuje obroty krążka—

100 zębów. Wdymamy powietrze do pudła i jednocześnie pociągamy smyczkiem o widełki; w tej chwili koła zębate są jeszcze odsunięte od osi. Oba przyrządy dźwięczą razem, widełki wydają ton wyższy; w miarę jednak silniejszego wdymania powietrza i zwiększania prędkości obrotu krążka syreny, wysokość tonu tej ostatniej ciągle wzrasta, aż wreszcie brzmi ona w *unissono* z widełkami. Gdy to nastąpiło, przysuwamy przez naciśnięcie sprężyn koła zębate do osi, notujemy położenie wskazó-

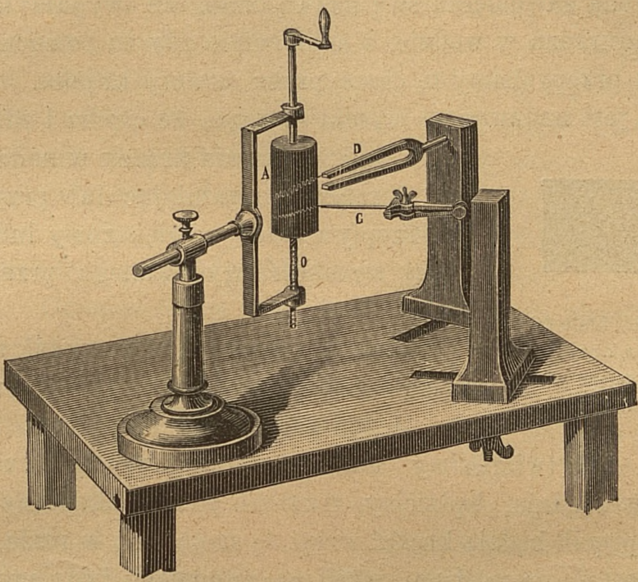


Fig. 187. Wibroskop Duhamela.

wek oraz czas i pozwalamy tonowi syreny rozbrzmiewać przez kilka minut, dajmy na to przez 3 minuty, naciskając przytem równomiernie miechy tak, aby nie zmienić wysokości tonu, nareszcie po upływie rzeczonego czasu odsuwamy znowu koła od osi. Przypuśćmy, że wskazówka pierwszego koła przesunęła się o 30 podziałek, drugiego zaś—o 36; znaczy to, że krążek zrobił przez ten czas 3630 obrotów, a że przy każdym obrocie powstaje 16 fal dźwiękowych, mnożąc tedy 3630 przez 16, otrzymamy liczbę drgań widelek w ciągu 3 minut—58080, czyli w ciągu 1

sekundy 363 drgań. W podobny sposób możemy także oznaczyć częstość drgań jakiegokolwiek ciała dźwięczącego: wyprężonej struny, piszczałki organowej i t. d. Za pomocą którejkolwiek z opisanych syren możemy się przekonać, że ton, który rozróżniamy w muzyce jako *oktawę* innego tonu, powstaje przy liczbie drgań 2 razy większej, niż ten ostatni; w podobny sposób *kwintę* otrzymujemy przy $1\frac{1}{2}$ razy większej częstości drgań i t. d. O stosunkach tych obszerniej pomówimy w końcu niniejszego rozdziału.

Syrena zawdzięcza swą nazwę temu, że wydaje także ton będąc zanurzona w wodzie, a mianowicie gdy za pomocą silnego ciśnienia przepychamy tę ciecz przez otwory krążka. Ton jej przytem jest nadzwyczaj wysoki dlatego, że ciężka i silnie naciskana woda wprawia krążek w nader szybki ruch obrotowy; zwalniając lub przyśpieszając przepływ cieczy, zwiększamy lub zmniejszamy wysokość wydawanego przez syrenę tonu.



Fig. 188. Linie falowe, nakreślone przez drgające widełki strojowe.

W niektórych razach możemy tak urządzić, że ciało dźwięczące samo zapisuje swe drgania. Jeżeli naprzykład do jednego ramienia widełek przytwierdzimy lekki zaostrzony pręcik i, wprawiwszy je w drgania, będziemy trzymali ponad zakopconym papierem, to pręcik będzie kreślił wciąż tę samą linię w razie, gdy papier pozostaje na miejscu, jeżeli go natomiast będziemy równomiernie wysuwali z pod widełek, to otrzymamy falową linię (fig. 186, str. 280), której każde dwa wygięcia, czyli cała fala, odpowiadają jednemu całkowitemu drganiu widełek. Na tej zasadzie polega *wibroskop* Duhamel'a. Przyrząd ten (fig. 187, str. 281) składa się z pionowo ustawionego walca *A*, pokrytego zakopconym papierem i osadzonego na śrubowej osi *o* tak, że przy każdym obrocie walec jednocześnie się nieco obniża. Ostrze drgających widełek kreśli na papierze linię falową odnośnego tonu; jeżeli więc stosowny aparat zegarowy zaznaczy jeszcze na tej linii początek i koniec każdej sekundy, to liczba fal, zawartych pomiędzy dwoma następującemi po sobie znaczkami, da nam licz-

bę drgań widełek na sekundę. Figura 188 (str. 282) pokazuje takie falowe linie, jak one się przedstawiają na papierze, po zdjęciu go z walca. Powyższa metoda może także być zastosowana do ciał drgających, posiadających rozmaite inne formy, jak sztaby, błony i t. d. Później poznamy inną jeszcze, optyczną metodę badania drgań dźwiękowych.

Nie każdą liczbę drgań ucho ludzkie odróżnia jako ton. Słuch nasz w samej rzeczy posiada dwie granice, po za któremi nie odczuwamy już muzykalnych tonów. Savart oznaczył najniższą granicę dla słuchu ludzkiego, jako równą 8 drganiom na sekundę; aby jednak tak powolne oscylacye zlać w jeden ton, musiał on użyć bardzo silnych uderzeń; według tegoż uczonego, najwyższą granicę dla słuchu stanowi 24000 drgań na sekundę, którą to liczbę oznaczył on za pomocą koła zębatego i odpowiedniego aparatu zegarowego. Dokładniejsze jednak poszukiwania Helmholtza, wykonane w nowszych czasach, pokazały, że pierwsza granica leży przy 16, druga zaś przy 38000 drganiach na sekundę. Granice te nie mogą zresztą być ściśle określone dlatego, że zdolność słyszenia różnych tonów jest niejednakową u różnych ludzi. Nic zabawniejszego, powiada John Herschel, jak gdy z 2-ch osób, cieszących się zkądinąd dobrym słuchem, jedna skarzy się na świszczący ton małej fujarki, podczas gdy druga utrzymuje, iż fujarka ta wcale nie wydaje żadnego tonu. Tyndall podczas jednej wycieczki w Alpach Berneńskich rozkoszował się ćwierkaniem owadów, gdy przyjaciel jego nic z tego wszystkiego nie słyszał. Weźmy za punkt wyjścia ton o 16 drganiach, pomnóżmy tę liczbę przez 2, otrzymany iloczyn znowu przez 2 i t. d. 11 razy, a znajdziemy, że otrzymana w końcu liczba 32768 drgań odpowiada 11-ej oktawie zasadniczego tonu (o 16 drganiach). Jeżeli więc przyjmiemy podane przez Helmholtza granice, to słuch ludzki obejmuje mniej więcej 11 oktaw. Nie wszystkie jednak tony, leżące pomiędzy temi granicami, używane są w muzyce; częstość drgań zwykłych muzykalnych tonów leży pomiędzy 40 a 4000 na sekundę, co w okrągłych cyfrach wynosi 7 oktaw.

Światło, podobnie jak dźwięk, polega także na drganiach pewnego nader sprężystego środka—eteru; różne barwy, tak samo jak tony różnej wysokości, zostają wytworzone przez rozmaitą częstość drgań. Barwy świetlne następują po sobie w takiej kolei: czerwona, pomarańczowa, żółta, zielona, niebieska, indygo i fioletowa; najmniejsza częstość drgań odpowiada czerwieni, największa zaś—fioletowi. Otóż ucho o wiele przewyższa oko pod względem rozległości skali odczuwanych wrażeń: Podczas gdy pierwsze obejmuje 11 oktaw, drugie natomiast obejmuje zaledwie więcej niż jednę, najszybsze bowiem drgania (skrajnego fioletu), odczuwane przez oko jako światło, mają tylko około 2 razy większą prędkość, niż najpowolniejsze (skrajnej czerwieni); najszybsze zaś drgania, rozróżniane przez ucho jako muzykalny ton, następują po sobie przeszło 2000 razy prędzej, niż najpowolniejsze.

Znając częstość drgań, odpowiadającą pewnemu tonowi, możemy łatwo znaleźć odnośną długość fali w danym środku. W podanym poprzednio przykładzie widełki strojowe drgają 363 razy na sekundę; ponieważ podczas jednej całkowitej oscylacyi dźwięk przenosi się na długość jednej fali (patrz str. 259), to w ciągu 1 sekundy przeniesie się on na 363 fal, a że w tymże czasie dźwięk w powietrzu o zwykłej temperaturze (15^0 C.) przebywa drogę 340 metr., na tej więc przestrzeni rozmieści się 363 fal, czyli że długość 1 fali równa się $^{340}/_{363}$, t. j. prawie 1 metrowi. W wodorze przy 0^0, w którym dźwięk rozprzestrzenia się z prędkością 1270 metr. na sekundę (patrz str. 241), długość fali, odpowiadająca rzeczonemu tonowi, równałaby się $^{1270}/_{363}$, czyli $3^1/_2$ metr. i t. d. W ogóle *długość fali, odpowiadająca pewnemu tonowi w danym środku, równa się prędkości dźwięku w tym środku, podzielonej przez odnośną częstość drgań*; z tego zaś wynika, że *częstość drgań równa się prędkości dźwięku, podzielonej przez długość 1 fali*, oraz że *prędkość dźwięku równa się iloczynowi z częstości drgań przez długość 1 fali.*

Wysokość tonu zależy jedynie od ilości fal dźwiękowych, wpadających do ucha w ciągu danego czasu; im większa jest ona, tem wyższy jest ton, im mniejsza—tem niższy. Zazwyczaj liczba

fal jest ta sama, co i częstość drgań ciała dźwięczącego, niekiedy jednak słyszymy przy jednakowej liczbie drgań ton wyższy albo niższy, zależnie od tego, czy źródło dźwięku zbliża się do nas, czy też oddala, albo też czy my zbliżamy się lub oddalamy od ciała dźwięczącego. Przykład lepiej nam pomoże zrozumieć tę zasadę, wygłoszoną po raz pierwszy przez Doepplera w r. 1842. Przypuśćmy, że widz jakiś stoi przed posągiem Kopernika na Nowym Świecie w Warszawie i że regularnie co 5 minut wychodzi tramwaj ze stacyi przy placu Trzech Krzyży na plac Zygmunta; wtedy w ciągu 1 godziny przejdzie przed tym widzem 12 tramwajów. Jeżeli zaś będzie on szedł w stronę rzeczonej stacyi, to w ciągu godziny przejdzie koło niego więcej, niż 12 tramwajów; (to samo miałoby miejsce, gdyby widz stał na miejscu, a stacya mogła się zbliżać do niego), przeciwnie, gdy będzie on szedł w stronę placu Zygmunta, w ciągu godziny minie go mniej niż 12 tramwajów (to samo nastąpiłoby, gdyby stacya tramwajów mogła się oddalać od stojącego na miejscu widza). Otóż podobnie się rzecz także ma z dźwiękiem: gdy ciało dźwięczące zbliża się do obserwatora, albo ten ostatni do źródła dźwięku, wtedy przy jednakowej częstości drgań, ucha jego dochodzi większa liczba fal, a więc słyszy on ton wyższy, niż wtedy, gdy ciało dźwięczące i słuchacz znajdują się we względnym spoczynku. Przeciwnie, gdy źródło dźwięku oddala się od obserwatora, albo ostatni od tego ciała, wtedy przy jednakowej częstości drgań, o ucho jego uderza mniejsza liczba fal tak, że słyszy on niższy ton, niż w razie spoczynku ciała dźwięczącego i słuchacza. W samej rzeczy, gdy w pobliżu osoby, stojącej na stacyi, przebiega gwiżdżąca lokomotywa, to przy zbliżaniu się ostatniej, osoba ta słyszy wyraźnie, jak ton świstawki staje się coraz wyższy i jak przy oddalaniu się lokomotywy ton ten ciągle się obniża. Doświadczenia, wykonane w tym względzie przez Buys-Ballota na drodze żelaznej Utrecht-Maarsen, później zaś przez Scotta-Russel'a na drogach żelaznych w Anglii, zupełnie stwierdziły słuszność zasady Doepplera.

Ta sama zasada stosuje się także, jak to później zobaczymy, do światła: barwa światła, wysyłanego przez jakąś

gwiazdę, przesuwa się w stronę czerwieni albo fioletu, gdy gwiazda ta oddala się od nas albo zbliża.

§ 2. Drgania strun. Węzły i pętlice. Tony harmoniczne.

Przypatrując się skrzypcom, widzimy na nich 4 struny rozmaitej grubości i z różnego materyału, z jednej strony stale przymocowane do deki skrzypiec, z drugiej zaś okręcone wokoło kołków, za pomocą których możemy struny mniej lub więcej naprężać. Struny te, stale podparte w dwu punktach tak, iż posiadają jednakową długość, przeciągnięte są nad podstawką, przytwierdzoną do pudła, mającego w dwóch miejscach otwory w kształcie znaku *ſ* i wydają tony, których wysokości znajdują się do siebie w pewnym określonym stosunku. Gdy stosunek ten jest naruszony, albo innemi słowy gdy skrzypce są odstrojone, możemy go znowu przywrócić, zakręcając odpowiedni kolek w jednę lub drugą stronę; zależnie od kierunku zakrętu, odnośna struna zostaje silniej albo słabiej naprężona i daje ton wyższy albo niższy. Ponieważ jednak 4 tony nie wystarczają do wykonywania utworów muzycznych, gracz więc może jeszcze dowolnie zwiększyć liczbę tonów, skracając długość brzmiących strun przez naciskanie ich w odpowiedniem miejscu palcami lewej ręki.

Z pobieżnej tej obserwacyi znanych wszystkim skrzypców, które wybraliśmy jako przykład instrumentu muzycznego strunowego, łatwo już domyśleć się można, że zachodzi pewien związek pomiędzy wysokością tonów z jednej, a długością, grubością, naprężeniem i materyałem strun z drugiej strony. Ponieważ zaś wysokość tonów zależy, jak już wiemy, od częstości drgań, przeto i ta ostatnia musi pozostawać w pewnym związku z rzeczonemi cechami strun. Najważniejsze z praw, dotyczących tej zależności, znane już były w ogólnych zarysach starożytnym filozofom, zwłaszcza pytagorejczykom; prawa te zostały jednak ustalone na drodze doświadczalnej dopiero w roku 1630 przez Mersenne'a. Teoretyczną zaś stronę tej kwestyi rozwinęli: Taylor, Jan i Daniel Bernoulli, d'Alembert, Euler, zwłaszcza zaś sławny matematyk francuzki Lagrange.

Zanim jednak przejdziemy do rozważenia tych praw, musimy sobie zadać pytanie, dlaczego wyprężone struny należy umieszczać nad pudłem z otworami, aby otrzymać muzykalny ton. Dzieje się to dlatego, że drgania samej wyprężonej struny nie wystarczają do wytworzenia tonu, jak tego dowodzi następujące doświadczenie: Na żelaznej podpórce *C* spoczywa drewniany kloc *A B*, od obu końców którego zwieszają się sznury, zakończone pętlicami; przez te ostatnie przesunięta jest sztaba żelazna *m n*, do środka której przywiązany jest stalowy drut *s s'*, wyprężony przez ciężar *W*, uczepiony do dolnego jego końca (fig. 189). W ten sposób drut jest oddzielony od wszelkich sprężystych ciał o większej powierzchni, którym mógłby udzielać swe drgania. Otóż gdy zarwiemy palcem tak zawieszony drut, wtedy doskonale widzieć będziemy jego drgania, nie usłyszymy jednak żadnego tonu. Rozmiary ciała drgającego są w tym wypadku tak małe, że za każdym jego ruchem otaczające powietrze opływa tylko naokoło niego, następuje tylko miejscowy przypływ i odpływ powietrza, dalej zaś leżące powietrze pozostaje w spoczynku. Jeżeli natomiast ten sam drut, wyprężony przez taki sam ciężar, naciągniemy nad podstawkami, opartemi na dece skrzypiec, albo poniżej opisanego przyrządu—monochordu, drut za każdem drgnięciem nadaje impuls dece, która przytem cokolwiek się ugina, wprawiając przez to w drgania całe pudło oraz zawarte w niem powietrze. Jak-



Fig. 189. Drgania samej tylko struny nie wystarczają do wytworzenia tonu.

kolwiek amplituda drgań takich pudeł jest bardzo niewielka, to jednak wskutek szerokości ich dek, otaczające powietrze nie może już opływać naokoło nich, lecz ulega zgęszczeniom i rozrzedzeniom, tworząc wyraźny układ fal dźwiękowych i powstaje dosyć silny ton. To samo dotyczy drgania wszelkich innych ciał o małych rozmiarach: gdy są one odosobnione, wtedy nie wydają wyraźnego tonu, czynią to zaś natychmiast, gdy opieramy je o duże powierzchnie ciał sprężystych, naprzykład o stół lub drzwi, albo jeszcze lepiej o t. zw. pudło rezonansowe (przedziurawione pudło odpowiednich rozmiarów, wzmacniające ton ciała drgającego). Przy poszukiwaniu praw, według jakich zachodzą drgania strun,

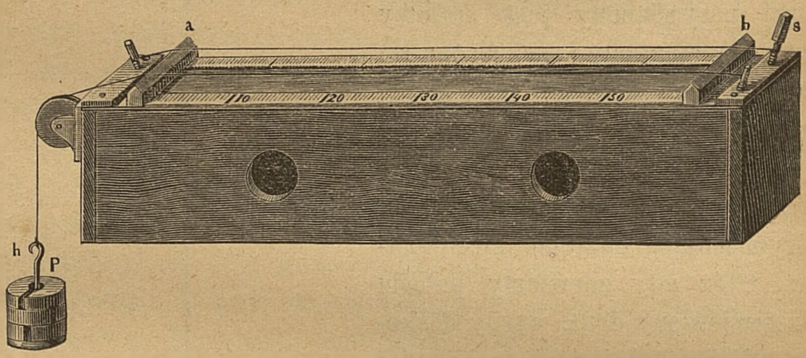


Fig. 190. Monochord.

używają przyrządu, zwanego *monochordem* ([1]) albo *sonometrem* ([2]). Składa się on z drewnianego pudła rezonansowego ze struną, naciągniętą nad dwiema stałemi podstawkami, opartemi na dece pudła (fig. 190). Jeden koniec tej struny—której długość mierzy się odległością podstawek, odczytywaną na skali—jest stale przyczepiony do kołka, drugi zaś koniec przerzuca się przez blok i zaopatruje w pętlicę, do której przyczepia się różne ciężary, mniej lub więcej naprężające strunę. Napiąwszy strunę przez uczepienie stosownego ciężaru tak, ażeby przy zarwa-

([1]) Od wyrazów: monos—jeden i chorda—struna.
([2]) Co znaczy po polsku: dźwiękomierz.

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

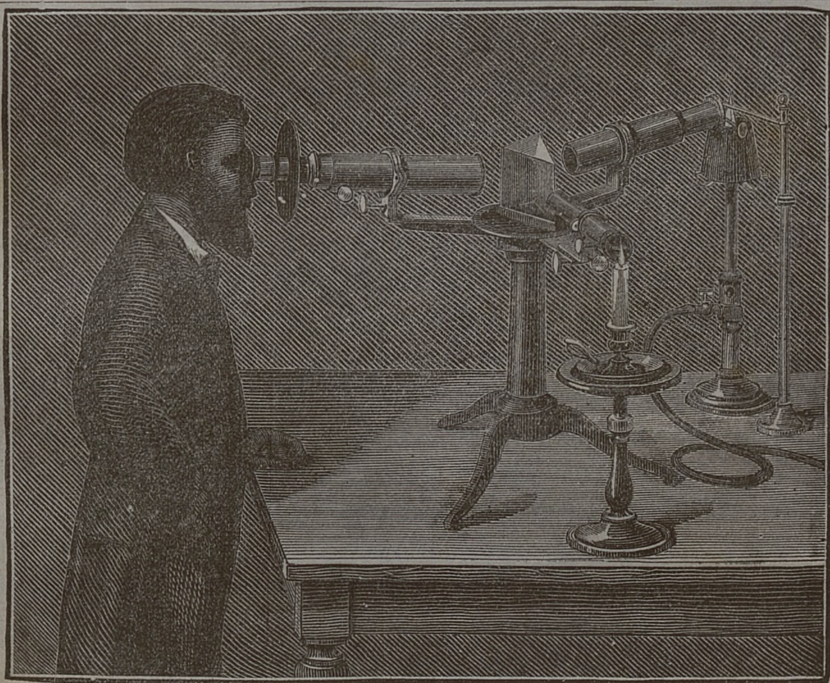
Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop. Zeszyt 10. Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.

niu wydawała wyraźny ton, oznaczamy za pomocą syreny odpowiadającą mu częstość drgań. Wiemy wtedy, ile oscylacyj struna ta, drgając jako całość, wykonywa w ciągu 1 sekundy; niechaj częstość drgań wynosi naprzykład 440, długość zaś struny—60 centym. Jeżeli teraz podeprzemy strunę w samym środku za pomocą dającej się przesuwać podstawki, albo gdy naciśniemy ją w rzeczonym punkcie palcem i zarwiemy tylko połowę struny, to usłyszymy oktawę poprzedniego tonu, czyli ton o podwójnej liczbie, t. j. o 880 drganiach. Oddzielmy w podobny sposób $^1/_3$, $^1/_4$ i t. d. struny i zarwijmy oddzieloną część, a wyda ona ton o potrójnej—1320, poczwórnej—1760 i t. d. liczbie drgań. Z tego wyprowadzamy prawo, że *liczba drgań struny jest odwrotnie proporcyonalna do jej długości.* Pozwólmy znowu tej samej strunie drgać jako całość, zmieńmy jednak wyprężający ją ciężar, a zobaczymy, że liczba jej drgań w ciągu sekundy staje się 2, 3, 4, 5 i t. d. razy większą, gdy zwiększamy ciężar 4, 9, 16, 25 i t. d. razy. Pierwsze liczby przedstawiają pierwiastki kwadratowe ostatnich, otrzymujemy więc drugie prawo, według którego *liczba drgań struny jest wprost proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z ciężaru naprężającego.* Przygotujmy sobie kilka strun z tego samego materyału, lecz różnej grubości, nadajmy im jednakową długość, naciągając je nad temi samemi podstawkami i wyprężmy je za pomocą równych ciężarów, a przekonamy się, że przy zarwaniu grubsze struny dają tony niższe, a więc o mniejszej ilości drgań, niż cienkie. Jeżeli średnice tych strun mają się do siebie jak liczby 1, 2, 3,4 i t. d., to częstości drgań, odpowiadające wydawanym przez nie tonom, są w stosunku liczb 4, 3, 2, 1 tak, że *liczba drgań struny jest odwrotnie proporcyonalna do jej średnicy.* Nareszcie 4-te prawo otrzymujemy przy użyciu strun z różnego materyału. Przygotujmy sobie 2 struny—żelazną i platynową, nadajmy im jednakową grubość oraz długość i wyprężmy je za pomocą równych ciężarów, a przy zarwaniu struna żelazna wyda wyższy ton, niż platynowa. Przy podobnem doświadczeniu znaleziono, że jeżeli naprzykład platynowa struna wykonywa 1000 drgań na sekundę, to żelazna w tymże czasie wykonywa ich 1640: liczby te mają się do siebie jak 1 : 1,64;

te ostatnie liczby przedstawiają pierwiastki kwadratowe liczb 1 i 2,69. Porównywając z drugiej strony ciężary właściwe platyny—21,04 i żelaza—7,8, znajdujemy, że ciężary te znajdują się w stosunku odwrotnym, niż ostatnio wymienione liczby 1 i 2,69, to jest w stosunku 2,69:1. Z doświadczeń tych wyprowadzamy więc następujące prawo: *liczba drgań struny jest odwrotnie proporcyonalna do pierwiastku kwadratowego z ciężaru właściwego albo z gęstości materyału, z którego wyrobiona jest struna.*

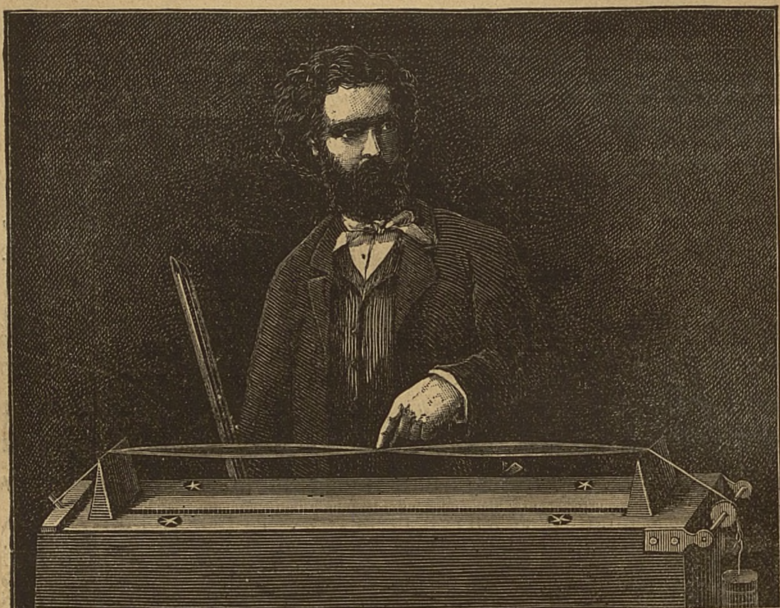


Fig. 191. Drgania oddzielnych części struny.

Wyłuszczone wyżej prawa stosują się jednak tylko do wypadku poprzecznych drgań struny, to jest drgań, zachodzących w kierunku prostopadłym do długości struny, jak to ma miejsce przy zarywaniu jej palcem albo przy pociąganiu smyczkiem. Jeżeli zaś będziemy przeciągali strunę wzdłuż suknem, posypanem kalafonią, to wtedy wyda ona bardzo wysoki, przenikliwy ton, który powstaje wskutek podłużnych drgań cząstek struny, to jest drgań, zachodzących w kierunku samej długości struny, które podlegają innym prawom, niż powyżej wymienione. Drgania te

jednak nie bywają praktycznie stosowane i co najwyżej przy niezręcznej grze skrzypka obrażają nasze ucho, możemy je więc pominąć, musimy natomiast rozważyć tu jeszcze jedno ważne zjawisko, mianowicie drgania oddzielnych części strun, z czego wypływa *harmoniczne powinowactwo tonów.*

Dotykając palcem środka struny i pociągając smyczkiem jednę jej połowę (fig. 191, str. 290), otrzymujemy, jak o tem już nadmieniliśmy, *oktawę* czyli ton o 2 razy większej liczbie drgań,

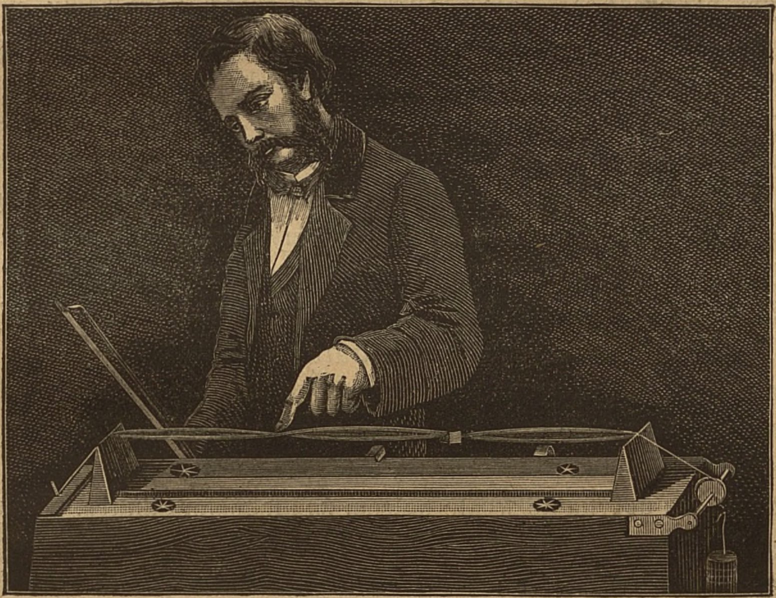


Fig. 192. Pętlice i węzły drgającej oddzielnemi częściami struny.

niż *ton zasadniczy*, wydawany przez strunę, gdy drga ona jako całość. Ważnem jednak jest to, że drga nietylko ta część struny, którą pociągnęliśmy smyczkiem, lecz i druga jej połowa, przytem tak, że gdy ta ostatnia idzie do góry, druga połowa jednocześnie idzie na dół i naodwrót. Możemy drgania niepociągniętej smyczkiem części struny uwidocznić, umieszczając na niej zgięte skrawki papieru, t. zw. koniki, które natychmiast spadają, gdy struna zaczyna drgać. Oddzieliwszy palcem $^1/_3$ część struny (fig. 193) i pociągnąwszy tę część smyczkiem, słyszymy, według

pierwszego z powyższych praw, ton o 3 razy większej liczbie drgań, niż ton zasadniczy, a więc o $^3/_2$ większej liczbie drgań, niż otrzymana w poprzednim wypadku *oktawa*. Ton ten o potrójnej liczbie drgań w stosunku do tonu zasadniczego, nazywamy *kwintą* jego oktawy. I w tym wypadku niepociągnięta smyczkiem część struny także zostaje wprawiona w drgania, przyczem jednak dzieli się na 2 równe części tak, iż cała struna składa się teraz, jak to pokazuje fig. 193, z 3 równych części, z których każda drga niezależnie od innych i przytem w kierunku przeciwnym, niż część sąsiednia. Drgające te części nazywamy *pętlicami*, środki tych ostatnich, mające największą amplitudę drgania—*brzuszkami*, zaś punkt, oddzielający dwie pętlice i pozostający podczas drgań struny we względnym spoczynku—*węzłem*. Koniki, umieszczone na węzłach, podczas drgań struny pozostają na miejscu, te natomiast, które znajdują się na pętlicach, spadają. W podobny sposób łatwo możemy strunę podzielić na 4, 5, 6 i t. d. oddzielnie drgających części z tylomaż pętlicami i z 3, 4, 5 i t. d. węzłami (liczba tych ostatnich jest zawsze o 1 mniejsza, niż liczba pętlic, nie licząc naturalnie 2-ch końcowych punktów struny, które, będąc stale przytwierdzone do deki, nie mogą wcale drgać, a więc także stanowią węzły). Zręczny gracz może nawet wywołać ten podział przez ostrożne pociąganie struny smyczkiem, nie dotykając wcale palcem żadnego jej punktu. Struna więc może drgać albo jako całość i wydawać ton zasadniczy o pewnej określonej liczbie drgań, albo podzielić się na 2, 3, 4, 5 i t. d. części i wytwarzać ton o 2, 3, 4, 5 i t. d. razy większej liczbie drgań. Tony, powstające w ten sposób, nazywamy *harmonicznemi tonami* albo *przytonami* tonu zasadniczego (najniższego, jaki w ogóle może wydawać struna danej długości); liczby ich drgań są zawsze wielokrotnemi liczby drgań tego ostatniego. Zobaczymy później, że okoliczność ta jest nader ważną dla teoryi muzyki.

Otóż niepodobna wcale dokonać tego, ażeby struna drgała *tylko* jako całość, zawsze dzieli się ona przytem mniej lub więcej wyraźnie na części, drgające jako niezależne od siebie struny. Jeden ruch nie przeszkadza przytem innym ruchom, podobnie jak

wahadło nie przestaje oscylować na płynącym okręcie, biorąc jednocześnie udział w jego kołysaniach i w jego ruchu postępowym. Tak samo jak struny, zachowują się wszelkie inne ciała dźwięczące: drgania całych ciał zawsze idą w parze z niezależnemi od nich drganiami oddzielnych części tak, że obok tonu zasadniczego, brzmiącego najsilniej, rozbrzmiewają także słabiej jego przytony. Wskutek zlewania się tych ostatnich z tonem zasadniczym powstaje to, co nazywamy kolorytem, brzmieniem (timbre) tonu, którym jeden instrument muzyczny różni się od innego. Struna naprzykład skrzypiec może być nastrojona na ten sam ton zasadniczy, co i klarnet, a jednak łatwo odróżniamy dwa te instrumenty. Przytony struny skrzypcowej są różne od przytonów klarnetu i gdy zlewają się one z jednym i tym samym tonem zasadniczym, nadają mu różne brzmienie. Do punktu tego powrócimy jeszcze w rozdziale, traktującym o analizie dźwięku.

§ 3. Drgania sztab, płyt, błon i dzwonów. Figury dźwiękowe Chladni'ego. Podłużne drgania sztab.

Sztaby nie potrzebują być naprężone albo obciążone jak struny, ażeby drgać; czynią one to już wskutek swej sprężystości, gdy, będąc umocowane w jednym lub w kilku punktach, zostają wyprowadzone z położenia równowagi. Drgania te mogą przytem być poprzeczne albo podłużne, zależnie od tego, w jaki sposób je wywołujemy: jeżeli uderzamy sztabę z boku lub odchylamy w stronę i następnie puszczamy, zaczyna ona drgać poprzecznie, gdy zaś przeciągamy ją wzdłuż suknem albo zwilżonemi palcami, to wprawiamy ją w drgania podłużne. Odkładając zbadanie tych ostatnich do końca niniejszego §, rozważmy tymczasem poprzeczne drgania sztab.

Umocujmy jeden koniec sztaby w śrubsztoku tak, jak to pokazuje fig. 168 na str. 251 i odchyliwszy drugi jej koniec, wypuśćmy go z ręki: sztaba drga wtedy jako całość z prędkością, zależną od jej grubości, długości, ciężaru właściwego oraz sprężystości i jeżeli prędkość ta jest dostatecznie wielka, słyszymy ton. *Częstości drgań sztab z tego samego materyału są niezależne*

od ich szerokości, wprost proporcyonne do ich grubości i odwrotnie proporcyonalne do kwadratów z długości. Sztaba 2, 3, 4 i t. d. razy grubsza od innej jednakowej z nią długości, drga tyleż razy prędzej; gdy zaś przy tej samej grubości jest ona 2, 3, 4, 5 i t. d. razy dłuższa od innej sztaby z tego samego materyału, wtedy drga ona 4, 9, 16, 25 i t. d. razy wolniej, niż ta ostatnia. Sztaba, przytwierdzona w rzeczony sposób, może także drgać oddzielnemi częściami, jeżeli jakiś punkt, położony pomiędzy obu jej końcami, będziemy słabo naciskali palcem; punkt ten staje się wtedy węzłem i oddziela dwie sąsiednie części, drgające zawsze w kierunkach przeciwnych. Przy podziale sztaby powstaje ton o większej liczbie drgań niż wtedy, gdy drga ona jako całość; wysokość tego tonu zależy od liczby węzłów. Z krótkich sztab, umocowanych w powyżej opisany sposób, można urządzić wcale znośny instrument muzyczny. Naprzykład w grającej tabakierce tony zostają wytworzone przez drgania małych *języczków* metalowych, przytwierdzonych w jednym tylko końcu; obracający się walec opatrzony jest sztyfcikami, które, odchylając i następnie puszczając swobodne końce tych języczków, wprawiają je w drgania tem szybsze, im mniejsza jest długość i im większa grubość języczka.

Sztaba, umocowana na obu końcach, drga—podobnie jak struna—albo jako całość i wydaje wtedy ton zasadniczy, albo też oddzielnemi częściami, dając wyższe tony; wysokość tych ostatnich podlega innemu prawu, niż kolejne tony harmoniczne struny. Ponieważ jednak tak umocowane sztaby nie znajdują zastosowania w muzyce, zbytecznem więc byłoby rzeczone prawo—dosyć zawiłe—szerzej wyłuszczać. Rozważmy natomiast jeszcze drgania sztaby, podpartej w dwóch innych, niekońcowych punktach. Chladni, któremu nauka o dźwięku bardzo wiele zawdzięcza, pierwszy dokładnie zbadał różne rodzaje drgań, wykonywanych przez tak podparte sztaby. Najprostszy wypadek ma miejsce, gdy sztaba podzielona jest przez dwa węzły (punkty podparcia) na 3 niezależnie drgające części; węzły te leżą wtedy mniej więcej na $^1/_6$ i $^5/_6$ długości sztaby tak, iż składa się ona z jednej całej pętlicy—od jednego do drugiego węzła i z 2 części

pętlicy, z których każda rozpościera się od węzła do bliższego swobodnego końca sztaby. Przy następnym podziale powstaje jeszcze 1 węzeł w samym środku pomiędzy dwoma poprzedniemi i sztaba dzieli się na 4 części; przy dalszych podziałach otrzymujemy 4, 5, 6 i t. d. węzłów, z których dwa zawsze leżą w punktach podparcia, przyczem wysokość tonu ciągle wzrasta, lecz w stosunku szybszym, niż liczba węzłów. Powstające w ten sposób tony są jednak nieharmoniczne, dlatego też do celów muzycznych posługują się tylko pierwszym rodzajem podziału o 2 węzłach, ułożonych tak, jak wyżej podano. Jako przykład może służyć instrument drewniany (fig. 193), w którym sztabki różnej

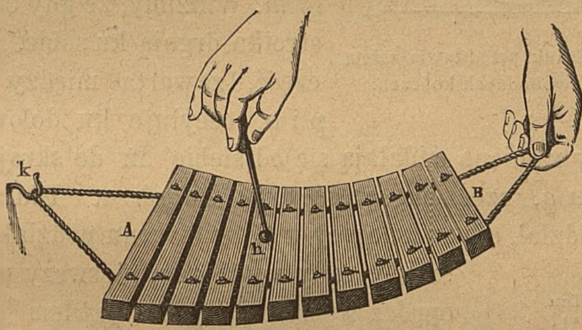


Fig. 193. „Instrument drewniany", zwany także skrzypcami słomkowemi.

długości i grubości podtrzymywane są w rzeczonych węzłach przez zwykłe sznurki lub słomę (od tej ostatniej instrument ten nosi także nazwę skrzypiec słomkowych). Zawieszając sznur na haku i trzymając drugi koniec sznura w ręku, możemy przez uderzanie o sztabki stosowną pałeczką otrzymywać dosyć dźwięczne tony.

Widełki strojowe (stroik, kamerton) nie przedstawiają nic innego, jak tylko zgiętą sztabę o swobodnych końcach. Niechaj *a a* przedstawia nam prostą sztabę, której węzły, odpowiadające pierwszemu rodzajowi podziału, oznaczone są przez kropkowane linie (fig. 194). Zegnijmy sztabę tak, aby przyjęła postać linii *b b*, a zachowa ona jeszcze oba węzły, które jednak znajdują się

teraz nieco bliżej siebie; ton zgiętej sztaby jest też nieco niższy, niż prostej. Zginajmy ją coraz więcej tak, ażeby kolejno przyjmowała postać linii *c c*, *d d* i t. d., a otrzymamy w końcu stroik *e e* o równoległych ramionach; zachował on oba węzły, które leżą wszakże o wiele bliżej siebie, niż wtedy, gdy sztaba była jeszcze prostą. Gdy stroik taki, po potarciu go smyczkiem, wydaje najniższy ton — zasadniczy, wtedy drga on w sposób, przedstawiony na fig. 195, na której węzły oznaczone są przez litery *p* i *q*, granice zaś, pomiędzy któremi oscylują ramiona stroika — przez litery *b n* i *f m*. Widzimy, że gdy oba ramiona stroika drgają ku sobie, zgięta jego część, zawarta między węzłami *p* i *q*, oscyluje ku dołowi i naodwrót—gdy ramiona oddalają się od siebie aż do skrajnych położeń *b p* i *m q*, rzeczona część drga ku górze. Dla stroika nie istnieje podział, odpowiadający trójwęzłowemu podziałowi prostej sztaby; gdy wydaje on pierwszy przyton, to oprócz węzłów *p* i *q*, na każdem jego ramieniu tworzy się jeszcze 1 nowy węzeł, tak iż stroik składa się wtedy z 5-ciu oddzielnie drgających części, odgraniczonych przez 4 węzły; tonowi temu odpowiada 5—6 razy większa częstość drgań, niż tonowi zasadniczemu. Przy dalszych podziałach wysokość odnośnego tonu nader szybko wzrasta. Górne te tony mniej lub więcej wyraźnie towarzyszą tonowi zasadniczemu, tak samo jak to się dzieje w innych wypadkach (patrz w tym względzie str. 293), ponieważ jednak bardzo prędko przebrzmiewają, przeto stroik przy dłuższem dźwięczeniu wydaje, jak to wykazał Chladni, tylko ton zasadniczy. Dla wzmocnienia tonu stroika, umieszcza się go, podobnie jak to się robi ze strunami, na pudle rezonansowem odpowiednich rozmiarów (fig. 196).

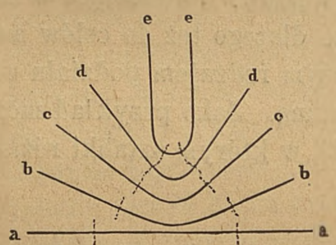


Fig. 194. Stroik przedstawia zgiętą sztabę o swobodnych końcach.



Fig. 195. Sposób drgania stroika przy wydawaniu tonu zasadniczego.

Płytę—to samo stosuje się do krążka—możemy rozpatrywać jako połączenie sztab. Płytę wprawia się w drgania, przymocowując ją w jakimkolwiek punkcie za pomocą odpowiedniego przyrządu, np. takiego, jaki przedstawia fig. 197 i pociągając brzeg jej smyczkiem. Przy takiem urządzeniu nie drga ona nigdy jako całość, lecz oddzielnemi częściami, odgraniczonemi przez miejsca pozostające w spoczynku, zwane *liniami węzłowemi*. Dwie sąsiadujące z sobą części drgają zawsze w kierunkach przeciwnych tak, że gdy jedna idzie do góry, druga oscyluje ku

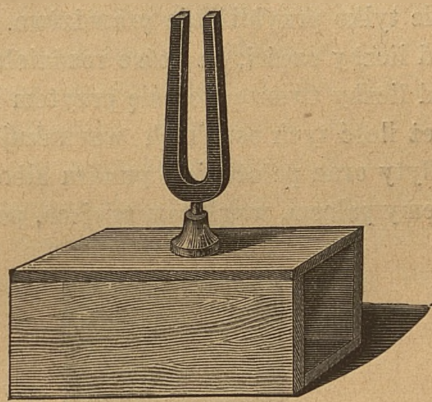


Fig. 196. Stroik z pudłem rezonansowem.

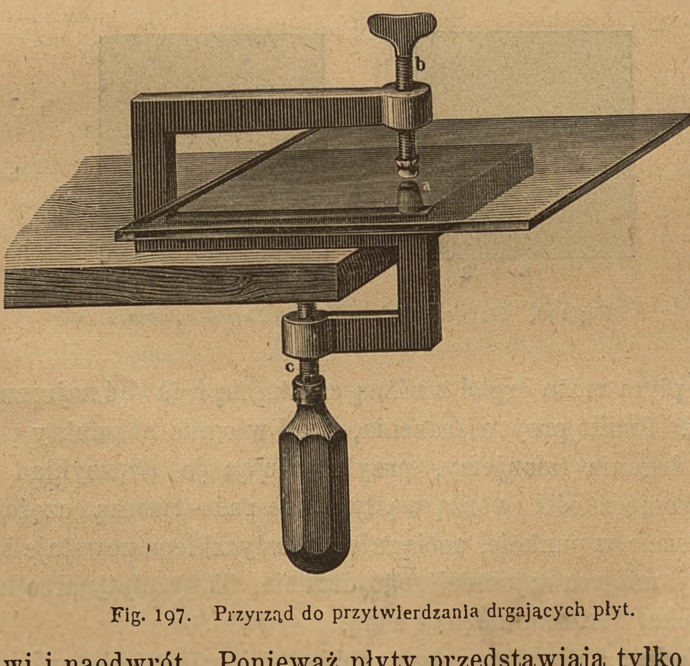


Fig. 197. Przyrząd do przytwierdzania drgających płyt.

dołowi i naodwrót. Ponieważ płyty przedstawiają tylko połączenie sztab, przeto podlegają one podobnemu co i te ostatnie prawu

orzekającemu, że *częstości drgań płyt z tego samego materyału są wprost proporcyonalne do ich grubości i odwrotnie proporcyonalne do kwadratów z ich średnic*, które to prawo jest jednak w tym razie tylko przybliżenie prawdziwe. Częstość drgań zależy nadto od liczby części, na które rozdziela się płyta i, co za tem idzie, od liczby tworzących się przytem linii węzłowych. Układ jakoteż ilość tych ostatnich warunkuje się sposobem przytwierdzenia płyty oraz położeniem punktu albo punktów, których ruch tamujemy palcem, względem miejsca, pociągniętego smyczkiem tak, że

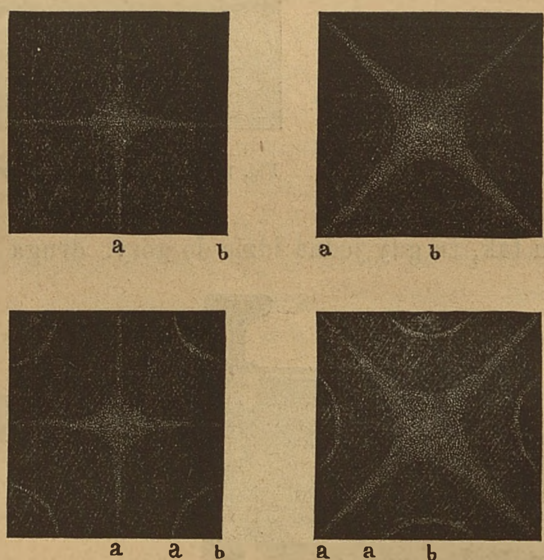


Fig. 198. Figury dźwiękowe Chladni'ego—Savarta.

ta sama płyta może drgać z różną częstością i dawać najrozmaitsze tony. Punkt przytwierdzenia, jak i w ogóle te punkty płyty, których drgania tamujemy, przytrzymując je naprzykład palcami, z konieczności tworzą węzły, inne zaś—tworzą części pętlic, wreszcie w punkcie, pociągniętym smyczkiem, powstaje brzuszek, t. j. miejsce najsilniejszego drgania. Tony płyty albo krążka są nieharmoniczne między sobą.

Chladni, który pierwszy dokładniej zbadał drgania płyt i krążków, podał bardzo łatwy sposób uwidoczniania tworzących

się na nich linii węzłowych. W tym celu drgającą płytę lub krążek posypuje się miałkim piaskiem, albo lepiej jeszcze proszkiem lycopodium; ziarnka piasku albo proszku zostają zrzucone z miejsc najsilniejszego drgania, t. j. z brzuszków, staczają się po równiach pochyłych, odgraniczonych liniami węzłowemi i zbierają się na tych ostatnich, tworząc w ten sposób t. zw. figury dźwiękowe Chladni'ego. Dla dokładnego odtworzenia kształtu tych figur, Savart zamiast piasku używał zaprawionej gumą mączki krochmalowej, którą obsypywał drgające płyty lub krążki; po utworzeniu się odnośnych figur, przykładał on do płyty lub krążka zwilżony arkusz papieru, do którego przykleja się mączka krochmalowa. Figura 198 przedstawia linie węzłowe, otrzymane sposobem Savarta: punkt, przytrzymywany palcami, oznaczony jest przez *a*, punkt zaś pociągnięty smyczkiem — przez *b*. Przypatrzywszy się dokładniej takim figurom dźwiękowym, widzimy, że na drgających płytach linie węzłowe układają się przeważnie w 2 kierunkach: równolegle do przekątnych płyty albo do jej boków, na krążkach zaś linie te układają się głównie w kierunku promieni. Ażeby otrzymać współśrodkowe linie węzłowe, należy brzeg przedziurawionego we środku krążka umocować w śrubsztoku (fig. 199) i nitką przesuniętą przez otwór pociągać wewnętrzny brzeg krążka w jakimkolwiek punkcie; ziarnka piasku albo proszku lycopodium układają się wtedy w rzeczone linie. Nie udało się jeszcze dotychczas znaleźć określonego związku pomiędzy kształtem figur dźwiękowych na płytach lub krążkach a wysokością odnośnych tonów i tyle tylko daje się powiedzieć, że im figura jest bardziej skomplikowana, tem wyższy jest ton.

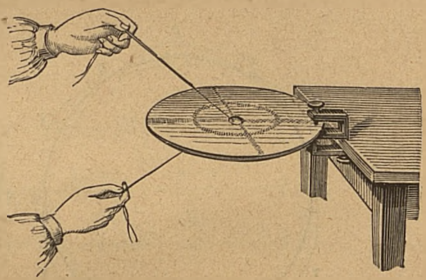


Fig. 199. Przyrząd do otrzymywania współśrodkowych linii węzłowych na drgających krążkach.

Jeżeli błonę równomiernie napniemy na obwodzie obręczy, albo naciągniemy wpoprzek wydrążonego walca i uderzymy o nią stosowną pałeczką, wtedy błona wpukla się i wypukla, drgając jako całość i daje ton zasadniczy; brzegi jej, będąc przytwierdzone, nie mogą brać udziału w tych drganiach, stanowią przeto węzły tak, że rozrzucony po błonie piasek stacza się całkowicie ku jej brzegom. Błona może atoli także drgać oddzielnemi częściami i daje wtedy tony wyższe, nieharmoniczne. Im grubsza i bardziej napięta jest błona, tem ton wydawany przez nią jest wyższy. Dwa bębny orkiestry stroi się tak, iż jeden z nich wydaje ton o $1\frac{1}{2}$ razy większej liczbie drgań, niż drugi; tony więc obu bębnów zawsze różnią się o kwintę.

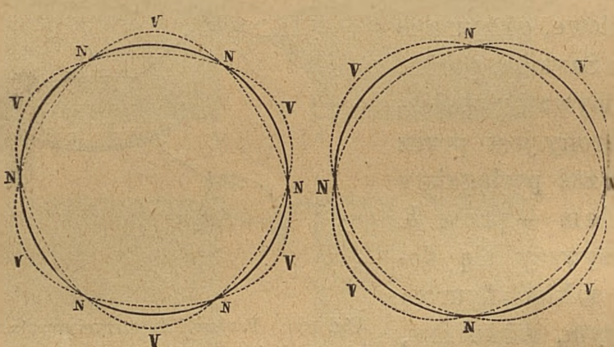


Fig. 200. Układ węzłów i brzuszków w drgającym dzwonie dla tonu zasadniczego i pierwszego górnego tonu.

Podobnie jak stroik uważaliśmy za zgiętą w dwa równoległe ramiona sztabę, tak też możemy dzwon rozważać jako zakrzywioną w odpowiedni sposób płytę. Dzwon nigdy nie drga jako całość, lecz dzieli się na *parzystą* liczbę równych odcinków, oddzielonych liniami węzłowemi, które biegną od leżących naprzeciw siebie punktów dolnego obwodu ku wierzchołkowi dzwonu. Na fig. 200 koło przedstawia poprzeczny przekrój dzwonu w stanie spoczynku. Jeżeli uderzymy młotkiem o środek którejkolwiek pętlicy *N N*, wtedy koło peryodycznie przyjmuje postać to jednej, to drugiej elipsy (patrz prawą stronę fig. 200). Dwa naprzeciwległe odcinki drgają zawsze w jednakowym kierunku, to jest ku sobie

albo od siebie, dwa zaś przylegające odcinki oscylują jednocześnie w kierunkach przeciwnych: gdy jeden z nich oddala się od środka koła, drugi się zbliża i naodwrót. Punkty przecięcia (N) elips ze sobą i z kołem stanowią węzły; te drgają bardzo słabo, najsilniej zaś oscylują punkty V, leżące na środku pomiędzy dwoma węzłami, t. j. brzuszki. Przy takim podziale—na 4 odcinki, oddzielone 4 węzłami—dzwon wydaje ton zasadniczy tem wyższy, im mniejsza jest powierzchnia i im większa grubość dzwonu. Przy następnym podziale (przedstawionym na lewej stronie fig. 200), odpowiadającym pierwszemu górnemu tonowi, powstaje 6 odcinków, rozdzielonych przez 6 węzłów; przy dalszych podziałach mamy 8, 10, 12 i t. d. (zawsze parzystą liczbę) odcinków i tyleż węzłów, przyczem powstaje coraz to wyższy ton.

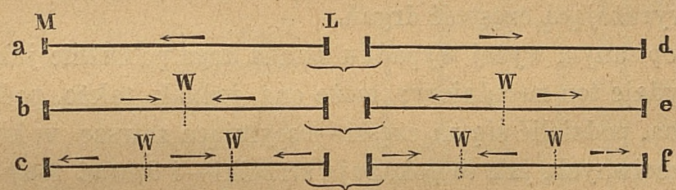


Fig. 201. Układ węzłów w podłużnie drgającej sztabie, przytwierdzonej w obu końcach: *a b*—ton zasadniczy, *c d*—pierwszy przyton, *e f*—drugi przyton.

Opisany powyżej układ węzłów i brzuszków można łatwo sprawdzić, zawieszając w różnych punktach lekkie kulki, dotykające brzegów drgającego dzwonu tak, jak to pokazuje fig. 169 na str. 252: najsilniej zostają wtedy odrzucone kulki, zwieszające się przy brzuszkach, najsłabiej zaś te—które dotykają węzłów. Gdy Tyndall zbliżał kulę z kości słoniowej, zawieszoną na krótkim sznurku, naprzemian to do drgającego odcinka to do któregoś z węzłów wielkiego dzwonu w Westminsterze, wtedy rzeczona kula w pierwszym wypadku odrzucana była na 5 cali, w drugim zaś—tylko na $2^3/_4$ cala.

Rozważmy teraz podłużne drgania sztab, powstające, jak już nadmieniliśmy, wskutek przeciągania wzdłuż tych ostatnich

suknem albo palcami. Powstający przytem ton jest znacznie wyższy od tego, jaki wydaje sztaba jednakowej długości, drgając poprzecznie.

Umocujmy sztabę żelazną w obu końcach (fig. 201, str. 301) i pocierajmy ją wzdłuż suknem, posypanem żywicą: impuls biegnie (*a*) od jednego końca sztaby (*L*) do drugiego (*M*), wywierając ciśnienie na ścianę *M*, ciągnienie zaś—na *L*, poczem wraca napowrót (*b*), wywierając teraz, przeciwnie, ciśnienie na *L*, ciągnienie zaś—na *M*. Czas, jakiego potrzebuje dźwięk na przebycie drogi tam i napowrót, odpowiada jednemu drganiu. Czas, w którym ciało wykonywa jednę całkowitą oscylacyę, nazywamy *peryodem drgania*. Łatwo zrozumieć, że im większa jest liczba drgań w ciągu 1 sekundy, tem krócej trwa każde pojedyńcze drganie, czyli że *peryod drgania jest odwrotnie proporcyonalny do częstości drgań;* równa się on w sekundach 1, podzielonej przez liczbę, wyrażającą częstość drgań.

W opisanym wyżej wypadku sztaba drga podłużnie jako całość i wydaje ton zasadniczy; może ona jednak także, podobnie jak struna, podzielić się na części—oscylujące zawsze w kierunkach przeciwnych, jak to pokazują strzałki—i dawać tony wyższe. Podeprzyjmy sztabę w samym środku, wtedy tworzy się tam węzeł: impulsy biegną (*c*) od końców sztaby tylko aż do środka *W*, odbijają się tam, wracają napowrót (*d*) i t. d. Droga, jaką przebywa dźwięk, jest teraz 2 razy krótsza, niż w poprzednim razie, wskutek czego i peryod drgania jest 2 razy mniejszy, czyli że sztaba tak podparta wykonywa w tym samym czasie 2 razy większą liczbę drgań, a więc daje oktawę tonu zasadniczego. Tak samo gdy sztaba dzieli się na 3 części (fig. 201, *e*, *f*), to wydaje ton o 3 razy większej liczbie drgań, przy 4 częściach—ton o 4 razy większej liczbie drgań, niż ton zasadniczy i t. d.

Weźmy teraz sztabę tej samej długości *L M*, lecz z ołowiu, a za pomocą syreny łatwo możemy się przekonać, że sztaba taka, drgając podłużnie jako całość, daje ton zasadniczy o 4 razy mniejszej częstości drgań, niż żelazna. Dlaczego tak jest? Oto poprostu dlatego, że dźwięk rozchodzi się w ołowiu 4 razy wolniej, niż w żelazie, czyli że dla przebycia tej samej drogi potrze-

buje on w pierwszym wypadku 4 razy dłuższego czasu, niż w drugim; przy tej samej długości, peryod drgania sztaby ołowianej jest więc 4 razy dłuższy, niż sztaby żelaznej, czyli że częstość drgań pierwszej jest 4 razy mniejsza, niż drugiej. Tak samo gdybyśmy wzięli sztabę z materyału, w którym dźwięk rozchodzi się 2 lub 3 razy wolniej albo prędzej niż w żelazie, to dawałaby ona ton zasadniczy o 2 lub 3 razy mniejszej albo większej liczbie drgań, niż sztaba żelazna jednakowej długości. Z doświadczeń tych wyprowadzamy dla podłużnie drgających sztab następujące prawo: *Częstości drgań sztab z różnego materyału są odwrotnie proporcyonalne do ich długości, wprost zaś proporcyonalne do prędkości rozchodzenia się w nich dźwięku.*

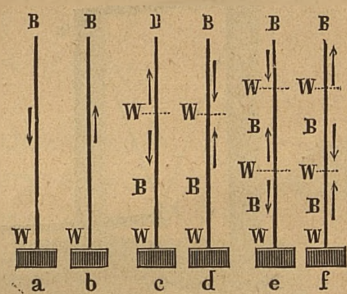


Fig. 202. Układ węzłów i brzuszków w podłużnie drgającej sztabie, przytwierdzonej w jednym końcu: *a b*—ton zasadniczy, *c d*—pierwszy przyton, *e f*—drugi przyton.

Na mocy powyższego łatwo oznaczyć względną prędkość dźwięku w różnych ciałach stałych. W tym celu dostatecznem jest przygotować z danych materyałów, naprzykład z dwóch różnych metali 2 sztaby, które, będąc p o d p a r t e w obu końcach i drgając podłużnie, dają ton zasadniczy jednakowej wysokości: stosunek długości tych sztab pokazuje wtedy zarazem stosunek prędkości dźwięku w obu metalach.

Wyłuszczone wyżej prawo stosuje się także w razie, gdy drgająca podłużnie sztaba przytwierdzona jest tylko w jednym końcu, albo gdy oba jej końce są swobodne, punkt zaś podparcia znajduje się pomiędzy niemi.

Umocujmy sztabę drewnianą albo metalową jednym końcem w śrubsztoku i pocierajmy ją wzdłuż palcami, pokrytemi żywicą, a otrzymamy muzykalny ton. Gdy sztaba wydaje ton zasadniczy, wtedy drga ona jako całość (fig. 202, *a b*); punkt przytwierdzony stanowi jedyny w tym razie węzeł *W*, swobodny zaś koniec—brzuszek *B* i impuls biegnie poprostu od tego ostatniego

do węzła i napowrót, jak to pokazują strzałki, przyczem sztaba naprzemian to się kurczy, to wydłuża. I tu znowu peryod drgania, a więc co za tem idzie, częstość drgań i wysokość tonu określa się czasem, jakiego potrzebuje dźwięk dla przebycia drogi od swobodnego do przytwierdzonego końca sztaby i napowrót, albo, ogólniej, od brzuszka do węzła i napowrót. Jeżeli ma powstać nowy węzeł, to musi on się przedzielić od poprzedniego (t. j. od przytwierdzonego końca sztaby) nowym brzuszkiem, zawsze bowiem na środku pomiędzy dwoma węzłami musi się znajdować brzuszek i naodwrót. Temu zaś warunkowi staje się zadość tylko wtedy, gdy nowy ten węzeł przypada na $^1/_3$ długości sztaby,

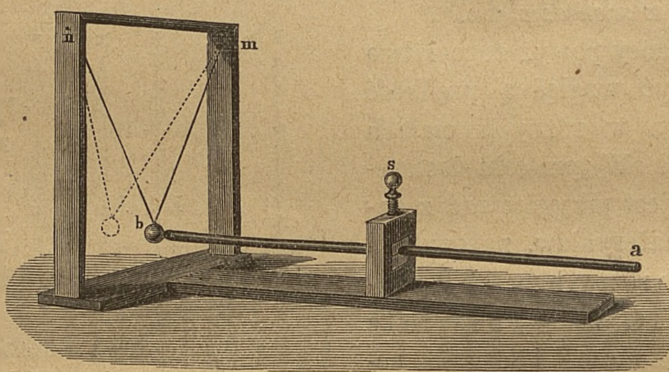


Fig. 203. Przyrząd Koeniga do badania podłużnych drgań sztaby o swobodnych końcach.

licząc od swobodnego jej końca. Sztaba podzielona jest wtedy (fig. 202, *c d*) na 2 części, drgające zawsze w kierunkach przeciwnych, t. j. jednocześnie oddalające się od węzła (*c*), albo zbliżające się ku niemu (*d*). Ponieważ odległość od brzuszka do węzła jest teraz 3 razy krótsza, niż w poprzednim wypadku, przeto peryod drgania będzie teraz również 3 razy krótszy, a więc powstającemu w tym wypadku tonowi—pierwszemu przytonowi odpowiada 3 razy większa częstość drgań, niż tonowi zasadniczemu. Podobne rozumowanie prowadzi nas do wniosku, że po następnym podziale układ węzłów i brzuszków musi być taki, jak to pokazuje fig. 202 w *e f:* Węzły leżą przy umocowanym końcu

sztaby oraz na $^2/_5$ i $^4/_5$ jej długości, licząc od rzeczonego końca, brzuszki zaś—na $^1/_5$, $^3/_5$ długości sztaby oraz przy swobodnym końcu; ponieważ odległość między brzuszkiem i węzłem wynosi teraz $^1/_5$ długości całej sztaby, przeto wydawanemu przez nią teraz tonowi—drugiemu przytonowi odpowiada częstość drgań, 5 razy większa, niż tonowi zasadniczemu. Tak samo przy następnych podziałach powstają kolejno przytony o 7, 9, 11 i t. d. razy większej liczbie drgań, niż ton zasadniczy. Widzimy więc, że *częstości drgań kolejnych harmonicznych tonów podłużnie drgającej sztaby, przytwierdzonej w jednym końcu, są do siebie w stosunku liczb 1, 3, 5, 7, 9 i t. d., czyli w stosunku kolejnych liczb nieparzystych.*

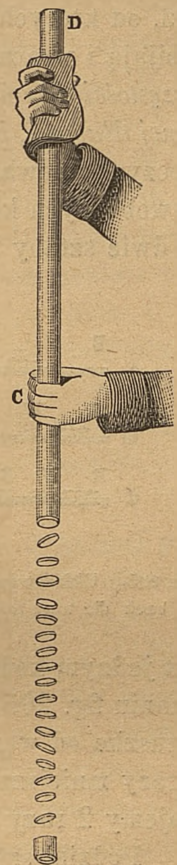


Fig. 204. Roztrzaskiwanie się rury szklanej przy podłużnych drganiach.

Rozważmy teraz kilka przykładów podłużnych drgań sztaby albo rury o swobodnych końcach. Zbadanie tego przedmiotu doprowadzi nas, jak to później zobaczymy, do bardzo ważnych rezultatów. Umocujmy (fig. 203, str. 304) środek sztaby *a b* za pomocą śruby *s* i zawiesiwszy na sznurkach *n b* i *m b* kulę z kości słoniowej tak, aby dotykała końca sztaby, pocierajmy silnie wzdłuż prawą połowę tej ostatniej. Słyszymy wtedy donośny muzykalny ton, pochodzący od sztaby, drgającej podłużnie nietylko tą połową, którą pocieramy, lecz i drugą połową, jak o tem świadczy szybkie odskakiwanie kuli od końca *b* sztaby. Pocierając wzdłuż rurę szklaną mokrą chustką, możemy łatwo zauważyć, jak warstewka cieczy, odłączająca się od chustki, tworzy na rurze wązkie drgające pierścienie, które powstają wskutek drgań znajdującego się pod niemi szkła. Te ostatnie możemy nawet tak spotęgować, iż, jak to pierwszy pokazał Savart, jedna połowa szkla-

nej rury roztrzaskuje się na oddzielne krążki, gdy silnie przeciągamy wzdłuż drugą jej połowę (fig. 204). Krążki te, jakkolwiek same są już bardzo cienkie, pokazują nadto pod mikroskopem liczne rysy, zdradzające dalszy podział drgań rury.

W wypadku, przedstawionym na fig. 203, środek sztaby stanowi jedyny węzeł, oba zaś jej swobodne końce tworzą brzuszki, od których impulsy biegną jednocześnie ku węzłowi, tam się odbijają i wracają napowrót; *otrzymujemy wtedy ton zasadniczy o częstości drgań, 2 razy większej, niż ton zasadniczy sztaby tej samej długości, lecz przytwierdzonej w jednym końcu.* W samej rzeczy ponieważ węzeł działa jak stała ściana, przeto sztaba o swobodnych końcach i umocowana we środku przedstawia jakby dwie sztaby 2 razy krótsze, z których każda przytwierdzona

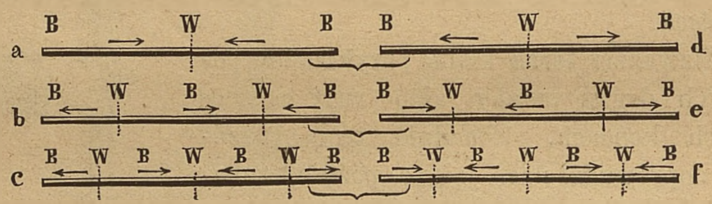


Fig. 205. Układ węzłów i brzuszków w drgającej podłużnie sztabie o swobodnych końcach dla tonu zasadniczego *a b*, pierwszego przytonu *c d* i drugiego przytonu *e f*.

jest jednym końcem, jak to najlepiej się uwidocznia przy porównaniu fig. 205 *a b* z fig. 202 *a b:* w pierwszym razie odległość brzuszka od węzła, którą warunkuje się peryod drgania, jest 2 razy mniejsza niż w drugim tak, że w pierwszym razie otrzymujemy 2 razy większą częstość drgań, niż w ostatnim.

Podział sztaby o swobodnych końcach z *jednym* tylko węzłem na środku (fig. 205 *a b*) odpowiada najniższemu jej tonowi—zasadniczemu. Sztaba jednak może jeszcze dalej się dzielić i dawać przytony. Ponieważ oba swobodne końce sztaby zawsze stanowią brzuszki i ponieważ na środku pomiędzy dwoma węzłami zawsze również znajduje się brzuszek, przeto w wypadku 2-ch węzłów, układ ich musi być taki, jak to pokazuje fig. 205 *c d:* węzły leżą na $^1/_4$ i $^3/_4$ długości sztaby, brzuszki zaś—na

obu jej końcach i na środku. Sztaba podzielona jest na 3 części,—drgające zawsze w kierunkach przeciwnych, jak to pokazują strzałki; a że odległość od brzuszka do węzła jest teraz 2 razy mniejsza, niż w *a b*, przeto peryod drgania jest 2 razy krótszy, otrzymujemy więc w tym wypadku ton—pierwszy przyton o 2 razy większej częstości drgań, niż ton zasadniczy. Możemy to sprawdzić, przymocowując sztabę *a b* (fig. 203), zamiast we środku, w punkcie, leżącym na $^1/_4$ jej długości: będąc potarta, daje ona wtedy oktawę tonu zasadniczego. Łatwo zrozumieć, że jeżeli dwa wyżej podane warunki mają być spełnione, to przy następnym podziale (fig. 205 *e f)* węzły muszą leżeć na $^1/_6$, $^3/_6$ i $^5/_6$ długości sztaby, brzuszki zaś—na obu jej końcach oraz na $^2/_6$ i $^4/_6$ jej długości; odległość brzuszka od węzła jest w tym wypadku trzy razy mniejsza niż w *a b* tak, że drugiemu przytonowi odpowiada 3 razy większa liczba drgań, niż tonowi zasadniczemu. Tak samo dalszym przytonom odpowiada 4, 5, 6 i t. d. razy większa częstość drgań, niż tonowi zasadniczemu. Widzimy tedy, że *częstości drgań kolejnych tonów harmonicznych podłużnie drgającej sztaby o swobodnych końcach są w stosunku liczb 1, 2, 3, 4, 5 i t. d., czyli w równym mu stosunku liczb parzystych 2, 4, 6, 8, 10 i t. d.*

W jakim stanie znajdują się różne punkty drgającej podłużnie sztaby? Węzły prawie wcale nie drgają, lecz tylko doznawają zmian gęstości, gdyż cząstki sztaby po obu stronach węzła poruszają się zawsze w kierunkach wprost przeciwnych, t. j. albo ku węzłowi (patrz fig. 201, 202 i 205), powodując w nim zgęszczenie, albo od węzła, przez co w tym ostatnim powstaje rozrzedzenie. W chwili, gdy w jednym węźle zachodzi największe zgęszczenie, w sąsiednim współcześnie powstaje największe rozrzedzenie (patrz np. fig. 205 *d*), gdyż cząstki, które zbliżają się do jednego węzła, jednocześnie oddalają się od sąsiedniego. Zupełnie przeciwnie się dzieje w punktach, leżących pośrodku między dwoma węzłami, t. j. w brzuszkach: gdy pewne cząstki oddalają się od brzuszka, posuwając się ku jednemu z leżących po obu jego stronach węzłów, to jednocześnie inne cząstki, oddalając się od drugiego węzła, zbliżają się do tegoż brzuszka (patrz np. środ-

kowe brzuszki *B* sztaby na fig. 205 *c* lub *d*) tak, że gęstość w brzuszkach się nie zmienia, natomiast ruch w tych punktach jest najsilniejszy. *W węzłach tedy mamy tylko maxima zgęszczeń lub rozrzedzeń bez żadnego, albo bardzo tylko nieznacznego drgania, w brzuszkach zaś—maximum ruchu bez zmian gęstości.* Stosunki te staną się dla nas jaśniejsze, gdy rozważymy drgania słupów powietrznych, zupełnie analogiczne do podłużnych drgań sztab.

§ 4. Zjawiska rezonansu czyli odbrzmiewania. Prawa drgań słupów powietrznych. Piszczałki. Metoda oznaczania prędkości dźwięku w gazach, cieczach i ciałach stałych.

Jeżeli stroik nie jest połączony z pudłem rezonansowem, to wydaje tylko bardzo słaby ton. Weźmy taki stroik, wykonywający naprzykład 340 drgań na sekundę i, pociągnąwszy go smyczkiem, zbliżmy do otworu cylindra *A B*, 30 centym. wysokiego (fig. 206): zaledwie możemy wtedy dosłyszeć ton stroika. Wlewajmy następnie ostrożnie wodę do cylindra, a slup zawartego w nim powietrza staje się coraz to krótszy wskutek podnoszenia się poziomu dolewanej wody; jednocześnie natężenie tonu stroika ciągle wzrasta i gdy woda dosięga pewnej wysokości, ton ten rozbrzmiewa bardzo silnie tak, iż słychać go w całym pokoju. Przy dalszem zaś dolewaniu wody, ton stroika znowu słabnie i w końcu staje się

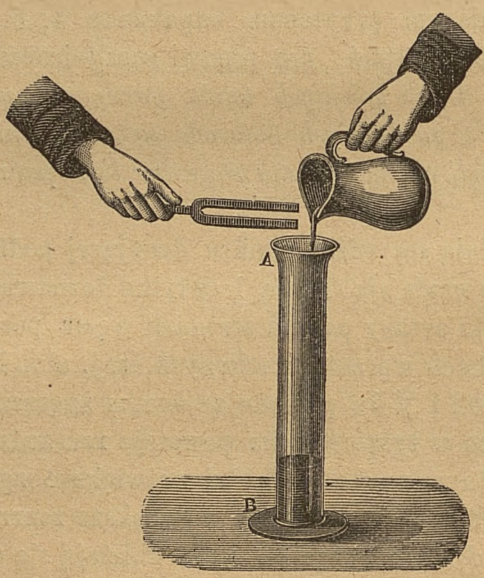


Fig. 206. Odbrzmiewanie słupa powietrza na ton stroika.

prawie tak cichy, jak w początku. Doświadczenie to pokazuje, że słup powietrza najsilniej odbrzmiewa na ton danych widełek strojowych wtedy, gdy posiada pewną określoną długość; wzmocnienie to tonu nazywa się *rezonansem*, samo zaś ciało, wzmacniające ton—*rezonatorem.* Jeżeli zamiast jednego, weźmiemy kilka stroików o różnych tonach, to dla każdego z nich możemy znaleźć żądaną długość słupa powietrza, przy której następuje najsilniejszy rezonans. Uczyniwszy to, przekonywamy się, że słup powietrza jest tem krótszy, im większa jest liczba drgań odnośnego tonu, na który ma odbrzmiewać, albo ściślej wyrażamy to prawem, orzekającem, że *długości słupów powietrznych, najsilniej odbrzmiewających na dane tony, są odwrotnie proporcyonalne do częstości drgań tych ostatnich.*

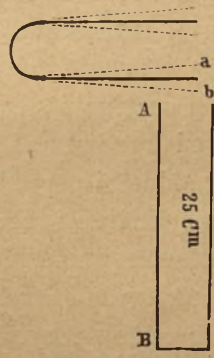


Fig. 207. Przyczyna rezonansu.

Jakaż jest przyczyna tego zadziwiającego faktu? Wzmocnienie tonu stroika może pochodzić tylko wskutek tego, że powietrze w pokoju zostaje wprawione w silniejsze drgania. W jakich tedy warunkach stroik może nadać temu powietrzu wzmocniony ruch? Ażeby odpowiedzieć na to pytanie, przypomnijmy sobie związek, zachodzący między częstością drgań, odpowiadającą danemu tonowi i długością odnośnej fali dźwiękowej (patrz str. 284): długość ta równa się prędkości dźwięku w danym środku (w naszym wypadku—w powietrzu), podzielonej przez częstość drgań. Dla stroika, użytego do powyższego doświadczenia, który wykonywa 340 drgań na sekundę, długość fali równa się $^{340}/_{340}$ [1], czyli 1 metrowi. Wiemy nadto (patrz str. 259), że w czasie, gdy stroik wykonywa 1 całą oscylacyę, dźwięk przenosi się na długość 1 fali, w danym więc razie—na 1 metr, w czasie trwania półoscylacyi — na długość półfali, w naszym więc wypadku—na $^1/_2$ metra. Zwa-

---

[1] We wszystkich przykładach, podawanych w tej księdze, przyjmujemy dla uproszczenia rachunku, że prędkość dźwięku w powietrzu równa się 340 metr.

żywszy to, podstawmy pod nasz drgający stroik (fig. 207) cylinder *A B* o wysokości $^1/_4$ metra (25 cent.), a więc wysokości, równej $^1/_4$ długości fali, odpowiadającej tonowi stroika i zobaczmy, co z tego wyniknie. W czasie, gdy ramię stroika oscyluje od położenia *a* do *b*, spowodowane przez ten ruch zgęszczenie powietrza przenosi się aż do dna cylindra, tam zostaje odbite i wraca napowrót do góry. Ponieważ zaś odległość od *A* do *B* i napowrót wynosi $^1/_2$ metra, przeto powracająca fala dźwiękowa spotka ramię stroika dokładnie w chwili, w której rozpoczyna ono drugą połowę swej oscylacyi, to jest ruch wsteczny od *b* do *a*. Pod cofającem się teraz ramieniem stroika powstaje rozrzedzenie powietrza, które również przenosi się aż do dna cylindra, tam się odbija, wraca napowrót do góry i—dla tej samej co wyżej przyczyny—trafia ramię w chwili, gdy dosięgło ono położenia *a* i rozpoczyna drugie już drganie. To samo powtarza się przy każdej nowej oscylacyi stroika; ten ostatni, jak widzimy, ma ten sam peryod drgania, co i słup powietrza długości $^1/_4$ metra, wskutek zaś tej zgodności peryodów drgania ruch coraz bardziej nagromadza się w cylindrze i rozchodząc się ztąd na cały pokój, powoduje owo gwałtowne wzmocnienie tonu. Pojmujemy teraz, dlaczego cylinder, użyty do doświadczenia, przedstawionego na fig. 206, był za długi; ażeby peryod drgania zawartego w nim słupa powietrza zrównać z peryodem drgania stroika, należało słup ten skrócić do $^1/_4$ długości fali, odpowiadającej tonowi stroika, a więc skrócić o 5 cent., cośmy właśnie uczynili, nalawszy do cylindra stosowną ilość wody. Widzimy tedy, że *długość słupa powietrza, zawartego w zamkniętej z jednej strony rurze i najsilniej odbrzmiewającego na dany ton, równa się $^1/_4$ długości odpowiadającej temu tonowi fali.* Jeżeli więc weźmiemy, zamiast powyższego, inny stroik, wydający naprzykład ton o 2 razy większej liczbie drgań, t. j. 680, to, ponieważ długość odpowiadającej temu tonowi fali równa się $^{680}/_{340}$ czyli $^1/_2$ metr., dla otrzymania przeto rezonansu należy wziąć cylinder długości $^1/_8$ metr. czyli $12\,^1/_2$ centymetr., a więc 2 razy krótszy, niż w poprzednim wypadku. Tak samo, dla wzmocnienia tonu o 3, 4, 5 i t. d. razy większej liczbie drgań, wypada użyć 3, 4, 5 i t. d. razy krótszego cylindra, na-

pełnionego powietrzem. W ten sposób tłómaczy się wymienione na str. 309 prawo, wyrażające związek między długością odbrzmiewającego słupa powietrza i częstością drgań odnośnego tonu.

Rozumie się, że zamiast powietrza moglibyśmy do powyższych doświadczeń również dobrze użyć jakiegokolwiek innego gazu; w takim jednak razie długości cylindrów musiałyby także być inne. Prędkość naprzykład dźwięku w gazie oświetlającym jest prawie $^{8}/_{5}$ razy większa, niż w powietrzu. Otóż za pomocą stosownych doświadczeń możemy się przekonać, że na ton stroika o 340 drganiach najsilniej odbrzmiewa słup gazu oświetlającego długości 40 centym., t. j. tyleż razy dłuższego od słupa powietrza (25-centymetrowego), ile razy dźwięk prędzej się rozchodzi w gazie oświetlającym, niż w powietrzu. Tak samo na ton stroika o 680 drganiach najsilniej odbrzmiewa słup gazu oświetlającego o długości 20 cent., t. j. 2 razy krótszy niż w poprzednim wypadku, na ton o 3, 4, 5 i t. d. razy większej liczbie drgań— 3, 4, 5 i t. d. razy krótszy słup tego gazu; zawsze jednak słup gazu oświetlającego jest $^{8}/_{5}$ razy dłuższy od słupa powietrza, odbrzmiewającego na ten sam ton. Nie trudno zrozumieć, dlaczego tak jest. W samej rzeczy, ponieważ dźwięk w gazie oświetlającym rozchodzi się $^{8}/_{5}$ razy prędzej, niż w powietrzu, przeto w pierwszym gazie przebiega on w tym samym czasie, t. j. podczas półoscylacyi stroika $^{8}/_{5}$ razy większą drogę, niż w drugim, a więc cylinder, napełniony pierwszym gazem, musi być także $^{8}/_{5}$ razy dłuższy od cylindra z powietrzem. Podobny rezultat otrzymalibyśmy dla każdego innego ciała lotnego: słup jego musiałby być tyleż razy dłuższy albo krótszy od słupa powietrza, odbrzmiewającego na ten sam ton, ile razy dźwięk rozchodzi się w tem ciele prędzej albo wolniej, niż w powietrzu. Zważywszy, że częstość drgań słupa gazu jest ta sama, co i częstość drgań tonu, na który słup ten odbrzmiewa, możemy zyskane dotąd rezultaty wyrazić następującem prawem, stanowiącem tylko uogólnienie prawa, wymienionego na str. 309: *Częstości drgań słupów różnych gazów są odwrotnie proporcyonalne do ich długości, wprost zaś proporcyonalne do prędkości rozchodzenia się dźwięku w tych gazach.*

Temu samemu prawu podlegają także drgania słupów cieczy i uważny czytelnik bez wątpienia dostrzegł już podobieństwo jego z prawem, dotyczącem podłużnych drgań sztaby, wymienionem na str. 303. Tak jest w samej rzeczy i możemy

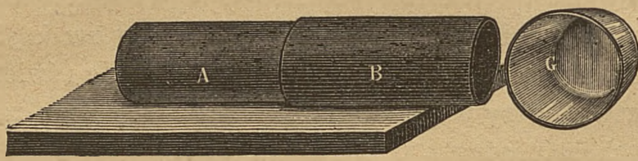


Fig. 208. Odbrzmiewanie słupa powietrza, znajdującego się w otwartej z obu stron rurze.

wszystkie te prawa uogólnić w jedno, obejmujące zarówno podłużne drgania sztab, jak i słupów gazów lub cieczy i które brzmi jak następuje: *Częstości drgań podłużnych różnych ciał—stałych, ciekłych czy lotnych—są odwrotnie proporcyonalne do ich długości i wprost proporcyonalne do prędkości rozchodzenia się w nich dźwięku.* Prawo to nie stosuje się jednak tak ściśle do drgań słupa gazu, jak do drgań sztaby dlatego, że słup taki nie jest ciałem odosobnionem, lecz komunikuje u otworu rury, w której jest zawarty, z zewnętrzną atmosferą, która działa zwalniająco na drgania słupa, wskutek czego wydawany przezeń ton, zarówno jak i ton, na który on odbrzmiewa, jest nieco niższy, niż wypada z teoryi.

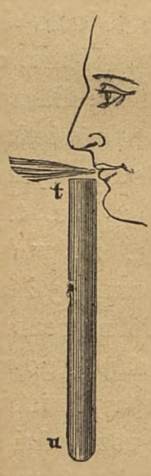


Fig. 209. Rura odbrzmiewa tylko na jeden z mięszaniny tonów.

Wróćmy jednak do zjawisk odbrzmiewania. Rezonans możemy także wywołać za pomocą otwartej z obu stron rury, składającej się zwykle z dwóch części, wchodzących jedna w drugą tak, że wyciągając albo wsuwając jednę z nich, możemy dowolnie zmieniać długość całej rury. Zbliżmy taką złożoną z 2-ch części rurę *A B* (fig. 208) do jakiegoś ciała dźwięczą-

cego, naprzykład do drgającego klosza *C* i wyciągajmy albo wsuwajmy część *A*: przy pewnej długości całej rury *A B*, ton klosza będzie najsilniej rozbrzmiewał, przy innej zaś—większej albo mniejszej, będzie znacznie słabszy. Za pomocą odpowiednich doświadczeń łatwo się przekonać, że i dla otwartych z obu stron rur *długości słupów powietrza (albo innego gazu), najsilniej odbrzmiewających na dane tony, są odwrotnie proporcyonalne do częstości ich drgań*. Porównywując zaś ze sobą długości 2 rur—jednej krytej, drugiej otwartej — odbrzmiewających na jeden i ten sam ton, znajdziemy, iż ta ostatnia jest dokładnie 2 razy dłuższa, niż pierwsza. A ponieważ długość rury krytej równa się $^1/_4$ długości odnośnej fali, z poprzedniego więc rezultatu wynika, że *długość słupa powietrza, zawartego w otwartej z obu stron rurze, który najsilniej odbrzmiewa na dany ton, równa się $^1/_2$ długości odpowiadającej temu tonowi fali*.

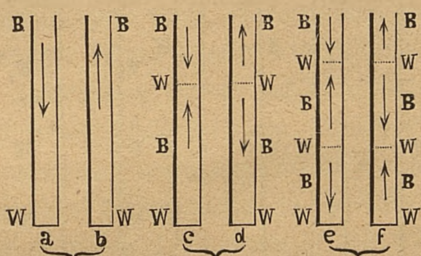


Fig. 210. Układ węzłów i brzuszków w rurze krytej dla tonu zasadniczego (*a b*) i dwóch pierwszych przytonów (*c d* i *e f*).

Rzeczony stosunek długości rury otwartej i krytej tłómaczymy sobie w następujący sposób: W krytej rurze (figura 210 *a b*) warstwa powietrza dotykająca dna, nie mogąc drgać z powodu przeszkadzającej temu stałej ściany, z konieczności tworzy węzeł; przeciwnie warstwa powietrza, znajdująca się u wylotu rury, komunikując z zewnętrzną atmosferą, zachowuje prawie stałą gęstość i, drgając najsilniej, stanowi brzuszek. Fala dźwiękowa biegnie poprostu od wylotu do dna, t. j. od brzuszka do węzła, tam się odbija i wraca napowrót, jak to pokazują strzałki. Natomiast w rurze otwartej (fig. 211 *a b*) warstwy powietrza, znajdujące się u jej wylotów, komunikują z zewnętrzną atmosferą i drgają najsilniej, tworzą więc brzuszki; ponieważ zaś między dwoma brzuszkami zawsze leży węzeł, na samym

więc środku otwartej rury przypada powierzchnia węzłowa (oznaczona na figurze kropkami), od której zbliżające się z dwu przeciwnych stron fale dźwiękowe odbijają się tak, jak od stałej ściany (fig. 211 *a*). Otwarta rura przedstawia przeto jakby dwie kryte i 2 razy krótsze rury o wspólnem dnie—powierzchni węzłowej—musi ona więc być 2 razy dłuższa, aby odbrzmiewać na ten sam ton, co rura kryta; tak też uczyniliśmy, nadając na fig. 211 rurze otwartej 2 razy większą długość, niż krytej, przedstawionej na fig. 210. Na jaki ton będzie tedy odbrzmiewała rura otwarta tej samej długości, co kryta? — Oczywiście, że na oktawę tonu tej ostatniej, czyli na ton o 2 razy większej liczbie drgań. Dostatecznie jest porównać figury 210 *a b* i 211 *a b* z fig. 202 *a b* i 205 *a b*, aby się przekonać, że słup powietrza, zawarty w rurze krytej drga jako całość, podobnie jak podłużnie drgająca sztaba, przytwierdzona na jednym końcu i że powietrze, znajdujące się w otwartej z obu stron rurze, drga tak, jak sztaba o swobodnych końcach.

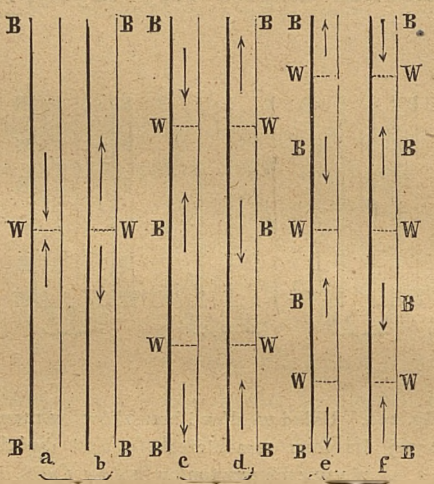


Fig. 211. Układ węzłów i brzuszków w otwartej rurze dla tonu zasadniczego (*a b*) i dwóch pierwszych przytonów (*c d* i *e f*).

Analogia ta rozpościera się, jak to zaraz zobaczymy, nie tylko na tony zasadnicze, lecz i na tony harmoniczne drgających podłużnie sztab i słupów powietrza (albo innego gazu).

Weźmy teraz kilka stroików, z których jeden wydaje ton o 340 drganiach, reszta zaś inne, różne tony, i pociągnąwszy stroiki smyczkiem, zbliżajmy je jeden po drugim do tej samej rury—krytej o długości $^1/_4$ metra, albo otwartej o długości $^1/_2$ metra,—a tylko jeden stroik, mianowicie pierwszy, wyda

silny ton. Dana rura odbrzmiewa tylko na ten ton, który powstaje wskutek drgań, zgodnych z własnemi jej drganiami i gdybyśmy nad nią trzymali nawet kilkanaście drgających stroików, wydających różne tony, to z powstającej w ten sposób mięszaniny drgań rura wybrałaby tylko te, które są zgodne z drganiami zawartego w niej słupa powietrza. Zważywszy to, wykonajmy teraz następujące proste doświadczenie (fig. 209. str. 312): Dmijmy wpoprzek otworu zamkniętej od dołu rurki *tu*, której długość niechaj wynosi $^1/_4$ metra: wskutek tarcia powietrza o brzegi otworu powstaje świszczący hałas, składający się z całego szeregu nieregularnych wstrząśnień. Otóż rurka wybiera z mięszaniny drgań te, które mają jednakowy peryod z drganiami zawartego w niej słupa powietrza i podnosi je, według pięknego wyrażenia Tyndalla, do godności muzykalnego tonu. Jestto ten sam ton, który otrzymalibyśmy, zbliżając do rurki odpowiedni stroik; w samej rzeczy słup powietrza, zawarty w rurce, jakby stwarza sobie w tym wypadku stosowny stroik, fale bowiem, które wychodzą z rurki, oddziaływując na cienką warstwę ruchomego powietrza, napływającego od naszych ust, zmuszają ją do dźwięczenia w *unissono* z powietrzem w rurce i narzucają tej warstwie rolę stroika. Podobnie także każde inne ciało, zdolne wydawać dźwięk, odbrzmiewa tylko na taki ton, który samo może wydawać i z mięszaniny różnych tonów wybiera i wzmacnia tylko taki ton. Na tem właśnie polega, jak później zobaczymy, zastosowanie rezonatorów do analizy dźwięków, t. j. do rozłożenia ich na składowe tony.

Przy słabem zadęciu rura kryta (figura 210 *a b*) albo otwarta (fig. 211 *a b*, str. 313 i 314) wydaje najniższy ton, jaki w ogóle dawać może,—jestto ton zasadniczy. Dmijmy nieco silniej, a ton chwilowo przybierze cechy hałasu, aż przy jeszcze silniejszem zadęciu otrzymamy pierwszy przyton; dmąc coraz silniej, wytwarzamy po kolei drugi, trzeci i t. d. przytony. Powietrze, zawarte w rurze, dzieli się przytem na coraz to większą liczbę części przedzielonych węzłami, z których dwie znajdujące się przy sobie drgają zawsze w kierunkach wprost przeciwnych, t. j. obie jednocześnie albo zbliżają się do węzła, albo oddalają

od niego, jak to pokazują strzałki. Kolejne podziały powietrza w rurze krytej dokładnie odpowiadają podziałom podłużnie drgającej sztaby, przytwierdzonej w jednym końcu (patrz fig. 202, str. 303), w rurze zaś otwartej—podziałom podłużnie drgającej sztaby o swobodnych końcach (patrz fig. 205, str. 306). I w tym wypadku, jak i przy podłużnie drgających sztabach, peryod drgania określa się czasem, jakiego potrzebuje dźwięk na przebycie drogi od brzuszka do najbliższego węzła i napowrót. Otóż dla rury krytej (fig. 210) droga ta jest w *c d* 3 razy, w *e f* zaś—5 razy krótsza, niż w *a b;* dla rury otwartej (fig. 211) droga ta jest w *c d* 2 razy, a w *e f*—3 razy krótsza niż w *a b*. Widzimy tedy, że kolejne tony drgających słupów powietrza podlegają prawu analogicznemu do tego, które dotyczy kolejnych tonów podłużnie drgających sztab: *Częstości drgań kolejnych tonów słupa powietrza, zawartego w rurze krytej, są do siebie w stosunku liczb nieparzystych 1, 3, 5, 7 i t. d., zaś w rurze otwartej—w stosunku kolejnych liczb 1, 2, 3, 4, 5 i t d., albo w równym mu stosunku liczb parzystych 2, 4, 6, 8, 10 i t. d.*

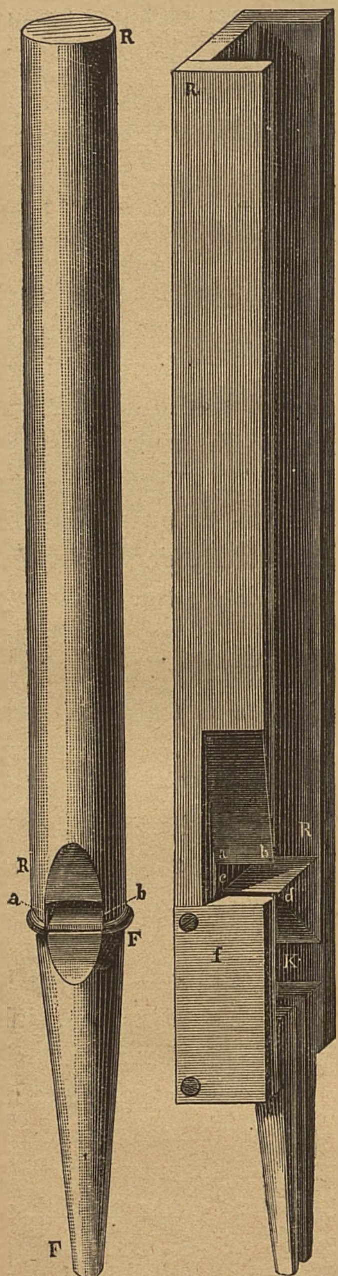


Fig. 212 i 213. Piszczałki wargowe: kryta i otwarta.

Zwróćmy się teraz do instrumentów dętych. Zasadniczą ich część stanowi pryzmatyczna albo walcowata rura, prosta lub zgięta w kilka

skrętów, w której powietrze zostaje wprawione w drgania przez zadęcie ustami albo miechem. Rury takie, które mogą być kryte albo otwarte, nazywamy w akustyce (nauce o dźwięku) *piszczałkami;* rozróżniamy dwa ich rodzaje: *wargowe* i *języczkowe*. Rozważmy z początku piszczałki wargowe.

Figura 213 przedstawia pryzmatyczną, otwartą piszczałkę organową w pionowym przekroju: aby lepiej uwidocznić wewnętrzne jej urządzenie. Przez dolny przewód wdyma się, za pomocą miechów, powietrze do komórki *K*, od góry prawie zupełnie zamkniętej tak, iż pozostaje tylko wązka szczelina *c d*, przez którą może wypływać ściskane w komórce powietrze. Wązki prąd powietrza przepływa za *dolną wargą*, znajdującą się przed szczeliną i uderza o ostrą krawędź *a b* *górnej wargi*, powodując przez to świszczący hałas, którego pewne drgania zostają wzmocnione przez zawarty w piszczałce słup powietrza i zamienione w ton. Ten ostatni powstaje więc tutaj w podobny sposób, jak w doświadczeniu, przedstawionem na fig. 209. Fig. 212 pokazuje zewnętrzny wygląd walcowatej, krytej piszczałki, mającej takie same wewnętrzne urządzenie, co i poprzednio opisana, nie wymaga ona więc dalszego opisu.

Prawa drgań powietrza w piszczałkach, odkryte przez Daniela Bernouilli'ego, wyłuszczyliśmy już wyżej, omawiając zjawiska odbrzmiewania. Zarówno w piszczałkach krytych, jak i otwartych, częstość drgań jest odwrotnie proporcyonalna do ich długości. Długość piszczałki krytej równa się $1/4$ długości fali odpowiadającej jej tonowi zasadniczemu, otwartej zaś—$1/2$ długości takiej fali; z tego wynika, że przy jednakowej długości piszczałka otwarta daje ton zasadniczy o oktawę wyższy od tonu zasadniczego piszczałki krytej. Wszystkie te prawa można sprawdzić, dmąc w piszczałki kryte i otwarte jednakowej formy, lecz różnej długości.

Przy słabem zadęciu piszczałki dają tony zasadnicze, przy coraz silniejszem—kolejne przytony, przyczem zawarte w piszczałkach powietrze dzieli się na coraz to większą liczbę oddzielnie drgających części tak, jak to pokazują fig. 210 i 211. Uprzytomnijmy sobie jeszcze raz stan powietrza w różnych punktach

piszczałki krytej i otwartej (patrz rzeczone fig.). Warstwy powietrza, stanowiące węzły, nie podlegają prawie wcale drganiu, lecz pozostają w miejscu, doznając tylko naprzemian zgęszczenia—gdy fale dźwiękowe z obu stron płyną ku nim, lub rozrzedzenia—gdy fale, odbiwszy się od węzłów, oddalają się od nich. Cząstki zaś powietrza w innych punktach przeciwnie drgają naprzemian to w jednę, to w drugą stronę, *najsilniej te, które leżą przy brzuszkach*, przyczem ma miejsce tylko bardzo nieznaczne zgęszczenie lub rozrzedzenie. Zważywszy to, możemy doświadczalnie wykazać, że układ węzłów i brzuszków w piszczałkach jest istotnie taki, jak go przedstawiają figury 210 i 211. Jeżeli naprzykład do wnętrza otwartej piszczałki o jednej szklanej ścianie będziemy opuszczali (w sposób przedstawiony na fig. 172, str. 255) błonę, obsypaną piaskiem, to zobaczymy, że w wypadku tonu zasadniczego piasek spokojnie leży na błonie tylko wtedy, gdy znajduje się ona w samym środku długości piszczałki—tam więc przypada węzeł i że w innych miejscach żywo podskakuje, najsilniej u wylotu i dolnego końca piszczałki—tam zaś przypadają węzły. Doświadczenie więc znajduje się w zgodzie z teoryą. Gdy piszczałka otwarta przy silniejszem zadęciu wydaje pierwszy przyton, wtedy według teoryi (patrz fig. 211 *c d*), brzuszki powinny się znajdować u obu końców i na środku, węzły zaś—na $^1/_4$ i $^3/_4$ długości piszczałki: zachowywanie się piasku na błonie w tych punktach pokazuje, że tak jest w istocie.

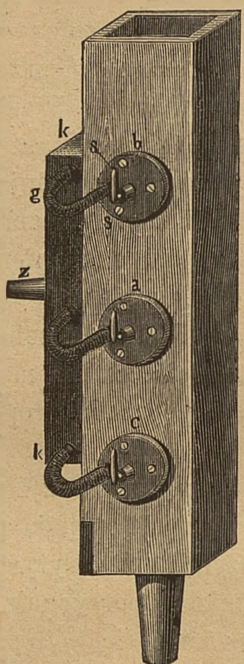


Fig. 214. Metoda Koeniga do wykazania węzłów i brzuszków w piszczałkach.

Jeszcze lepiej można wykazać położenie węzłów i brzuszków w piszczałce krytej lub otwartej, za pomocą t. zw. płomy-

ków manometrycznych Koeniga. W tym celu piszczałka otwarta (1) urządzona jest jak następuje (fig. 214): Jedna z jej ścian posiada na $^1/_4$, $^2/_4$ i $^3/_4$ swej długości otwory, zamknięte przez cienkie elastyczne błony; te ostatnie stanowią zarazem dna małych pudełek *b*, *a*, *c*, opatrzonych palnikami *s*. Błona, przypadająca przy węźle, zostaje, podczas każdego zgęszczenia się w nim powietrza zawartego w piszczałce, wypchnięta na zewnątrz; przeciwnie przy każdem rozrzedzeniu się tego ostatniego, zostaje napowrót wepchnięta przez ciśnienie zewnętrznej atmosfery tak, że błona ta drga bardzo silnie i zgodnie z powietrzem, zawartem w piszczałce. Błona natomiast, leżąca przy jakimś brzuszku, drga tylko bardzo słabo, z powodu nieznacznych, jak widzieliśmy wyżej, zgęszczeń i rozrzedzeń w takim punkcie. Drgania tych błon udzielają się płomieniom odnośnych palników, zasilanych gazem oświetlającym, który ze zbiornika przepływa przez rurę *z* do pustej skrzynki *kk*, a ztamtąd przez małe zgięte rurki *g* do każdego z pudełek. Fig 215 przedstawia oddzielnie przekrój jednego takiego pudełka. Zapalmy gaz, wypływający ze wszystkich trzech palników i zadmijmy w piszczałkę tak, ażeby wydawała ton zasadniczy, a wszystkie płomyki zaczną drgać, najsilniej jednak środkowy; gdy zaś przez zwolnienie dopływu gazu zmniejszymy płomyki, to środkowy z nich zgaśnie, podczas gdy dwa inne dalej się będą paliły. W tym więc wypadku węzeł istotnie znajduje się w środku piszczałki, jak tego wymaga teorya. Zadmijmy teraz silniej w piszczałkę tak, aby wydała pierwszy przyton, a zawarte w niej powietrze podzieli się na części tak, jak to pokazuje fig. 211 *c d*, to jest: w środku piszczałki mamy teraz

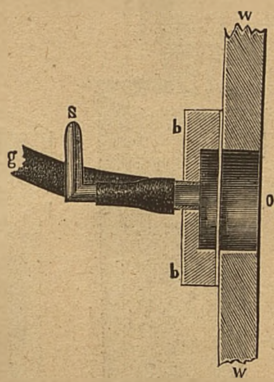


Fig. 215. Przekrój jednego z pudełek w piszczałce, przedstawionej na fig. 214.

(1) Tej samej jednak metody można użyć do wykazania węzłów i brzuszków w piszczałce krytej.

brzuszek zamiast węzła, węzły zaś przypadają na $^1/_4$ i $^3/_4$ jej długości. Jeżeli tak jest rzeczywiście i jeżeli mały płomyk przy węźle zawsze gaśnie, to przy zabrzmieniu pierwszego przytonu płomyki, palące się przy *b* i *c* powinny zgasnąć, zaś ten, który znajduje się pośrodku między niemi, to jest w *a*, powinien dalej się palić. Doświadczenie, kilkakrotnie powtórzone, a to w celu wykluczenia przypadku, pokazuje, że wywody nasze były słuszne.

Przejdźmy teraz do piszczałek *języczkowych*. Ton zostaje w nich wzbudzony za pomocą równomiernie przerywanego prądu powietrza, podobnie jak to się dzieje w syrenie. Rolę przerywacza prądu w tych instrumentach odgrywa drgający pasek z metalu lub z drzewa, zwany *języczkiem*.

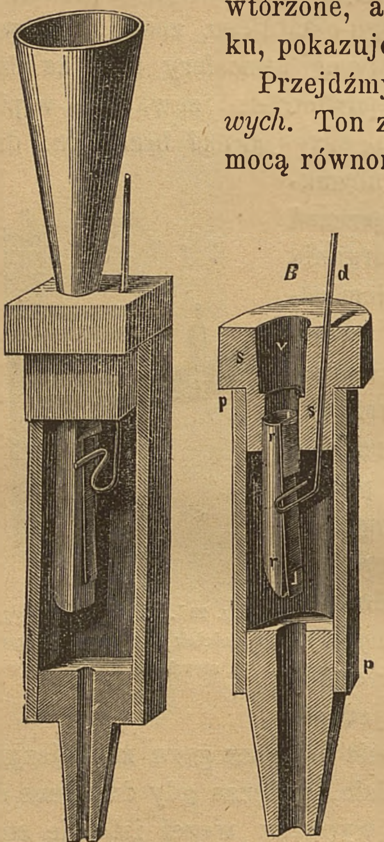


Fig. 216 i 217. Piszczałka języczkowa: wygląd zewnętrzny i przekrój pionowy.

Jeżeli języczek jest ciężki i względnie sztywny, wtedy zmusza on słup powietrza, zawartego w połączonej z nim piszczałce, do drgań zgodnych z temi, jakie sam wykonywa; gdy zaś jest lekki i bardzo giętki, to przeciwnie sam się dostosowuje do drgań słupa powietrznego. Ażeby w pierwszym wypadku odnieść korzyść z obecności piszczałki, należy długość jej tak uregulować, ażeby liczba drgań, odpowiadająca jej tonowi zasadniczemu albo któremukolwiek z przytonów, zgadzała się z liczbą drgań języczka. Gdy warunek ten jest spełniony, otrzymujemy ton czysty i bardzo silny; przy niewielkiem zresztą zboczeniu od zupełnej zgodności drgań, czystość tonu mało co zo-

Довволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

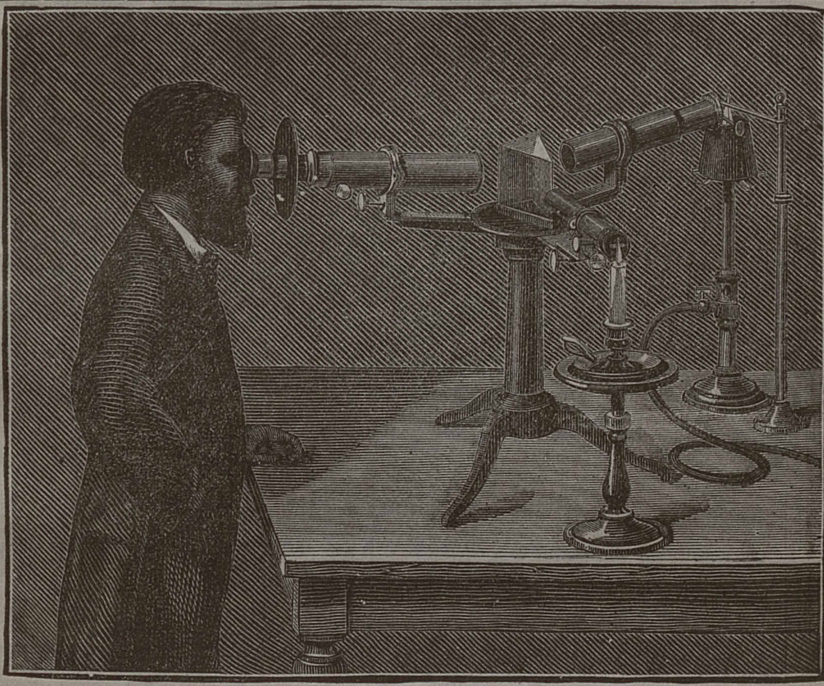
Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop. | **Zeszyt II.** | Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.

staje naruszona, gdy jednak zboczenie to przekracza pewne granice, wtedy piszczałka nie przynosi już żadnej korzyści, ton bowiem warunkuje się wtedy tylko drganiami samego języczka.

Daleko częściej jednak używa się języczków giętkich, przystosowywujących się do drgań odnośnych słupów powietrznych. Figury 216 i 217 przedstawiają zewnętrzny wygląd ([1]) i przekrój piszczałki języczkowej, używanej w organach. Powietrze wdmuchuje się przez dolny przewód do pryzmatycznej przegrody, zwanej nóżką, w której znajduje się pionowy rowek *r r*, zamykany *prawie* zupełnie przez giętki metalowy pasek—języczek *J*, stale przytwierdzony w jednym końcu, lecz zresztą swobodny i odstający nieco w stanie równowagi od brzegów rowka; ten ostatni komunikuje z rozszerzającą się ostrokręgowo ku górze otwartą piszczałką *v*, t. zw. *czarą głosową*. Wyciągając albo wsuwając drut *d*, przechodzący przez pokrywę nóżki i naciskający języczek, możemy zwiększyć lub zmniejszyć długość tego ostatniego i w ten sposób zmienić, w pewnych wszakże tylko granicach, prędkość jego drgań. Prąd powietrzny, wpływając z nóżki przez rowek do piszczałki, powoduje tam zgęszczenie; ponieważ jednak powietrze w nóżce, wskutek ciągłego dopływu gazu z miechów, dalej się zgęszcza, przeto przyciska ono wkrótce języczek do brzegów rowka tak, że ten zostaje prawie zupełnie zamknięty i prąd się przerywa. Następnie języczek, dzięki swej sprężystości, wraca do pierwotnego położenia, odmykając rowek, wskutek czego prąd powietrza znowu przepływa przezeń do piszczałki, wywołuje tam drugie uderzenie i t. d. Wskutek tych peryodycznie powtarzających się uderzeń powstaje bardzo silny ton. Języczek obniża ton piszczałki otwartej, z czego korzystają przy budowie organów i innych instrumentów.

Oprócz metalowych, używają się jeszcze w organach bardzo giętkie języczki drewniane, nader łatwo przystosowujące się do drgań znajdujących się nad niemi słupów powietrznych. Najprostszy przykład działania takich języczków daje nam zwy-

([1]) *Uwaga.* Przednia ściana tej piszczałki jest ze szkła tak, że możemy widzieć jej wnętrze.

czajne źdźbło z pszenicy. Natnijmy takie źdźbło (fig. 218) scyzorykiem w punkcie *r* na głębokość, równą mniej więcej $^1/_4$ średnicy źdźbła i obróciwszy nieco ostrze scyzoryka, poprowadźmy je ku bliższemu końcowi źdźbła, aż do pewnego punktu, a otrzymamy w ten sposób słomiany pasek *r r'*. Otóż niechaj pasek ten przedstawia nam języczek, źdźbło zaś—piszczałkę. Zadmijmy w nią, a usłyszymy dosyć czysty ton; odetnijmy kawałek źdźbła, a ton się podniesie, skracajmy je dalej, a usłyszymy coraz to wyższy ton. We wszystkich tych jednak wypadkach użyliśmy jednego i tego samego języczka, który właśnie za każdym razem musiał się przystosować do drgań słupa powietrznego.

Klarnet, obój, fagot, niektóre z piszczałek organowych oraz najdoskonalszy instrument muzyczny—narząd głosowy człowieka przedstawiają piszczałki języczkowe; niektóre piszczałki organowe, flet i t. d. należą do piszczałek wargowych krytych; trąby



Fig. 218. Przystosowywanie się giętkiego języczka do drgań słupa powietrznego.

zaś — do piszczałek wargowych otwartych. O instrumentach tych, zwłaszcza zaś o narządzie głosowym człowieka obszerniej pomówimy w końcu niniejszej księgi.

Poświęciliśmy tak wiele miejsca podłużnym drganiom sztab i słupów powietrznych nie tyle ze względu na znaczenie ich dla muzyki, ile raczej dlatego, że sposób, w jaki przedmiot ten poznano, przedstawia wyborną ilustracyę metody badania w fizyce. Metoda ta polega zarówno na wyprowadzaniu indukcyjnem praw z odnośnych zjawisk naturalnych albo sztucznych, t. j. doświadczeń, jak i na dedukcyjnem wyprowadzaniu nowych wniosków z prawd, doświadczalnie już ustalonych. Im bardziej przytem rozwinięty jest pewien dział fizyki, tem więcej daje się doń stosować druga część rzeczonej metody, t. j. dedukcya, z tem jednak zastrzeżeniem, aby zdobyte tą drogą wnioski były, o ile tylko można, sprawdzane przez doświadczenie. Otóż wyższy ten

stopień rozwoju danego działu fizyki cechuje się możnością postawienia pewnej teoryi czyli ogólnego poglądu na naturę wchodzących w zakres tego działu zjawisk, która z jednej strony dozwalałaby z jednolitego punktu widzenia rozpatrywać zdobyte już rezultaty nauki, z drugiej zaś—wytykałaby nowe kierunki i nowe przedmioty badania. A jeżeli nawet pewna teorya, jak to się nieraz w dziejach nauki zdarzało, z biegiem czasu upada, jako sprzeczna z nowoodkrytemi faktami, niemniej jednak oddaje ona w swoim czasie niepoślednie usługi, skierowywując na pewne ciemne jeszcze kwestye umysł badacza, który bez niej nie wiedziałby, co mianowicie i jak ma badać.

W akustyce rolę podobną oddawna odgrywa teorya rozprzestrzeniania się dźwięku, którą wyłuszczyliśmy w poprzednim rozdziale. Niejednemu zapewne z uważnych czytelników teorya ta wydawała się wtedy jeszcze zbyt mało ugruntowaną, przedstawiającą nadto zbyt mało punktów, które dałyby się wprost doświadczalnie sprawdzić, przyjmuje ona bowiem drgania cząstek powietrza, fale i t. d., których *bezpośrednio* widzieć ani zmierzyć nie możemy. Jedno wszakże już wtedy było dla nas pewne, to mianowicie, że jeżeli dźwięk istotnie rozprzestrzenia się tak, jakeśmy przyjęli, wtedy *prędkość jego w danym środku musi się równać długości fali, pomnożonej przez częstość drgań ciała dźwięczącego.* W toku niniejszego § widzieliśmy jednak, iż z tego twierdzenia — nie dającego się również jeszcze bezpośrednio sprawdzić—możemy wyprowadzić pewne wnioski, dotyczące zjawisk odbrzmiewania, drgań słupów powietrznych i dzielenia się ich na oddzielnie drgające części. Co więcej, na mocy tej teoryi, a właściwie jednego z jej wyników, wyrażającego rezultat krzyżowania się fal dźwiękowych naprzód biegnących czyli *postępowych* z falami odbitemi, Daniel Bernouilli, Chladni i Poisson zdołali wyprowadzić wszelkie prawa, dotyczące podłużnych drgań sztab, słupów cieczy albo gazów. Otóż wnioski te i prawa okazały się, jak widzieliśmy, zupełnie zgodne z doświadczeniem; to zaś przemawia za prawdziwością owego twierdzenia, jakoteż i teoryi, z której ono koniecznie wynika. W następnej księdze czytelnik znajdzie jeszcze bardziej przekonywający dowód słu-

szności tej teoryi w t. zw. zjawiskach interferencyi dźwięku, których wszelkie szczegóły dają się na jej zasadzie z góry przewidzieć i które dopiero w świetle tej teoryi stają się dla nas zrozumiałe.

Tymczasem zaś pokażemy, jak rzeczone twierdzenie, wynikające z teoryi rozprzestrzeniania się dźwięku, prowadzi do rozwiązania pewnych praktycznych zadań. W samej rzeczy, gdybyśmy oprócz częstości drgań pewnego tonu, łatwo dającą się oznaczyć za pomocą syreny, znali jeszcze długość odpowiadającej mu fali, to na mocy tego twierdzenia moglibyśmy także oznaczyć prędkość dźwięku w danym środku. Długości fali wprost mierzyć nie możemy; widzieliśmy atoli, iż długość ta równa się poczwórnej długości piszczałki krytej, albo podwójnej długości piszczałki otwartej, wydającej ten ton jako ton zasadniczy. Możemy tedy, nie wychodząc z pokoju i posługując się jedynie syreną oraz piszczałkami różnej długości, oznaczyć prędkość dźwięku w gazach i cieczach. Przypuśćmy, iż mamy piszczałkę otwartą o długości 1 metra, napełnioną powietrzem; dmijmy w nią tak, aby wydawała ton zasadniczy i niechaj odpowiadająca mu częstość drgań, oznaczona za pomocą syreny, wynosi 170; prędkość dźwięku w powietrzu równa się tedy $1 \times 2 \times 170$ czyli 340 metr. Chcąc otrzymać ten sam ton zasadniczy z piszczałki otwartej, napełnionej wodorem, znaleźlibyśmy, iż musi ona w tym celu być prawie $3^1/_2$ razy dłuższa, t. j. mieć $3^1/_2$ metr. długości; prędkość dźwięku w tym gazie równa się tedy $^7/_2 \times 2 \times 170$, t. j. 1190 metr., czyli że jest ona $3^1/_2$ razy większa, niż w powietrzu. Tak samo możemy oznaczyć prędkość dźwięku w innych gazach lub cieczach. W tym ostatnim wypadku przepycha się odnośną ciecz przez stosownie urządzoną piszczałkę; w ten sposób znaleźlibyśmy naprzykład, że piszczałka, napełniona eterem siarczanym, powinna być $3^1/_2$ razy dłuższa, niż takaż piszczałka, napełniona powietrzem, wydająca ten sam ton zasadniczy, co dowodzi, że prędkość dźwięku w tej cieczy jest prawie $3^1/_2$ razy większa, niż w powietrzu. Ale i podłużne drgania sztaby o swobodnych końcach podlegają temu samemu prawu, co i drgania słupa gazu, zawartego w piszczałce otwartej; długość takiej

sztaby także się równa $^1/_2$ długości fali odpowiadającej jej tonowi zasadniczemu tak, że prędkość dźwięku w jakimś materyale stałym równa się podwójnej długości takiej sztaby z tego materyału, pomnożonej przez częstość drgań jej tonu zasadniczego. W opisany tu sposób otrzymano niektóre z liczb, wyrażających prędkość dźwięku w różnych ciałach stałych, ciekłych i gazowych, podanych na str. 241. Pominęliśmy przytem pewne ostrożności, jakie należy zachować przy podobnych oznaczeniach oraz poprawki, jakie wypada wprowadzić do otrzymanych rezultatów. Chodziło nam bowiem tylko o wyłuszczenie samej zasady tej metody, opierającej się na teoryi rozprzestrzeniania się dźwięku, albo raczej na pewnych wynikających z niej twierdzeniach i o wykazanie w ten sposób jeszcze jednej korzyści, jaką nam teorya ta oddaje.

§ 5. Interwale tonów, używanych w muzyce. Gamy. Temperatura.

Doświadczenie pokazało, że tony, brzmiące jednocześnie albo następujące jeden po drugim, tylko wtedy wywierają na nas mniej lub więcej przyjemne wrażenie, gdy odpowiadające im częstości drgań są do siebie w stosunku prostym, nie bardzo się zbliżającym do jedności. Stosunek tonu wyższego do niższego, wyrażający odstęp między niemi pod względem wysokości, nazywamy *przestankiem* (interwalem). Najprostszy przestanek wykazuje ton o 2 razy większej liczbie drgań, niż ton zasadniczy, a więc o stosunku 2 : 1; wydaje się on naszemu słuchowi najbardziej spowinowacony z tonem zasadniczym do tego stopnia, że oba tony wyrażamy nawet jedną literą, nazywając wyższy *oktawą* niższego. Ponieważ jest dużo stosunków, mniejszych od 2 : 1, a jednak dosyć prostych, przeto między tonem zasadniczym a jego oktawą przypada jeszcze kilka interwałów. Przestanki kolejnych tonów *względem tonu zasadniczego*, jak je przedstawiają naprzykład tony kolejnych białych klawiszów fortepianu, są następujące:

Prima	Secunda	Tercya	Kwarta	Kwinta	Sexta	Septima	Oktawa
$^1/_1$	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	$^2/_1$
c	*d*	*e*	*f*	*g*	*a*	*h*	*c'*

Nazwa każdego tonu tłómaczy się miejscem, jakie zajmuje on w skali tych najprostszych przestanków, nazywanej *gamą diatoniczną;* najniższy ton (zasadniczy) gamy nazywamy jej *toniką.*

Tony, które brzmiąc jednocześnie, wywierają na nas przyjemne wrażenie, oznaczamy jako *zgodne*, samo zaś ich współbrzmienie—jako *współdźwięk*, inne zaś nazywamy *niezgodnemi*, a ich współbrzmienie—*rozdźwiękiem* (dyssonansem). Z wymienionych powyżej tonów, oprócz oktawy, najlepszy współdźwięk z primą daje kwinta, dalej—tercya, kwarta i sexta. Secunda i septima nie dają wprawdzie zgodnych tonów z primą, lecz musiano je włączyć do skali, ażeby zapełnić zbyt duże odstępy między primą i tercyą oraz między sextą i oktawą.

Mnożąc wyżej podane stosunki przez 24, możemy przestanki tonów gamy diatonicznej wyrazić calemi liczbami:

24	27	30	32	36	40	45	48
c	*d*	*e*	*f*	*g*	*a*	*h*	*c'*.

Stosunki te łatwo sprawdzić za pomocą syreny Seebecka o krążku z 8 współśrodkowemi szeregami otworów, z których najmniejszy posiada ich 24, następne—27, 30 i t. d., największy zaś—48. Dmuchając, przy jednostajnym obrocie krążka, kolejno przez te szeregi otworów, uslyszymy tony gamy diatonicznej; muzykalne ucho łatwo może odróżnić ton, powstający przy dmuchaniu przez otwory 5-go szeregu (o 36 otworach), licząc od środka krążka, jako kwintę tonu, wydawanego przez szereg o 24 otworach i t. d.

Dla lepszego odróżniania przestanków, wprowadzono odnośne nazwy tonów, składające się z liter lub zgłosek. W krajach północnych do tego celu służą litery *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *a*, *h*, w południowych zaś zgłoski do (ut), re, mi, fa, sol, la, si. Gamy diatoniczne możemy rozpoczynać nietylko od tonu zasadniczego *c*, lecz także od którejkolwiek z jego wyższych lub niższych oktaw.

Tony tych nowych gam są również oktawami odpowiednich tonów pierwszej gamy i z tego powodu oznacza się je temi samemi literami. Aby jednak módz odróżnić jednoimienne tony, nadano oddzielnym oktawom, z których każda obejmuje 7 tonów, różne nazwy. Oktawę, przypadającą we środku głosu męzkiego nazwano *oktawą małą*, a kolejne jej tony oznaczono małemi literami od *c* do *h*. Oktawa, bezpośrednio wyższa, przypadająca w środku głosu kobiecego, nazywa się *raz przekreśloną*, następna—*dwa razy przekreśloną* i t. d.; tony pierwszej oznacza się przez c', d'.... h', drugiej przez c'', d''.... h'' i t. d. Oktawa, bezpośrednio niższa od małej, nazywa się *oktawą wielką*, tony jej oznacza się dużemi literami od *C* do *H*. Idące za tą ostatnią niższe oktawy nazywamy raz podkreśloną albo *kontraoktawą*, dwa razy podkreśloną albo *subkontraoktawą*, trzy razy podkreśloną i t. d.; litery zaś, oznaczające ich tony podkreślamy raz, dwa, trzy razy i t. d. Kolejne naprzykład oktawy (niższe i wyższe) tonu *c* oznaczamy więc przez $\underline{\underline{\underline{C}}}$, $\underline{\underline{C}}$, $\underline{C}$, C, c, c', c'', c''' i t. d.

Porównywając ze sobą przestanki dwóch obok siebie stojących tonów powyższej gamy diatonicznej, a mianowicie dzieląc każdy stosunek przez poprzedzający go stosunek, widzimy, iż przestanki te nie są równe:

$$c \smile d \smile e \smile f \smile g \smile a \smile h \smile c'$$
$$\tfrac{9}{8} \quad \tfrac{10}{9} \quad \tfrac{16}{15} \quad \tfrac{9}{8} \quad \tfrac{10}{9} \quad \tfrac{9}{8} \quad \tfrac{16}{15}.$$

Największy przestanek $9/8$—nazwany *wielkim całym tonem*—powtarza się w gamie 3 razy, mianowicie od *c* do *d*, od *f* do *g* i od *a* do *h*; prawie równy poprzedniemu przestanek $10/9$, zwany *małym całym tonem*, leży między *d* i *e* oraz między *g* i *a*, nareszcie przestanek $16/15$, zwany *półtonem* powtarza się w gamie 2 razy od *e* do *f* i od *h* do c'. Pomijając nateraz różnicę między wielkim i małym całym tonem i uważając je za jednakowe, otrzymamy dla rzeczonej gamy następujące przestanki:

$$c \smile d \smile e \smile f \smile g \smile a \smile h \smile c'$$
$$1 \quad 1 \quad \tfrac{1}{2} \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad \tfrac{1}{2}$$

Szereg tonów, następujących po sobie według tego szematu, nazywa się gamą *dur*. Spróbujmy ułożyć taką gamę wychodząc

z kwinty *c*, t. j. z *g* jako z tonu zasadniczego. Gdybyśmy do tego użyli tylko tonów poprzedniej gamy *c-dur*, to otrzymalibyśmy następujący szereg:

g‿a‿h‿c′‿d′‿e′‿f′‿g′
1 1 $^1/_2$ 1 1 $^1/_2$ 1

Szereg ten różni się od poprzedniego przestankami między sextą i septimą oraz między septimą i oktawą, t. j. ton *f′* jest o $^1/_2$ tonu za mały względem *e′* i o $^1/_2$ tonu za duży względem *g′*. Chcąc więc dla gamy *g-dur* otrzymać taki sam szereg przestanków jak dla gamy *c-dur*, należy *f′* podwyższyć o $^1/_2$ tonu; podobne podwyższenie tonu oznaczamy przez krzyżyk ♯ i nadajemy takiemu tonowi nazwę, przyłączając do odnośnej litery zgłoskę *is*, w danym więc wypadku otrzymamy ton *fis′*. Gama *g-dur*, mająca takie same przestanki, co i *c-dur*, przedstawia się tedy jak następuje:

g‿a‿h‿c′‿d′‿e′‿fis′‿g′
1 1 $^1/_2$ 1 1 1 $^1/_2$

Dla gamy, rozpoczynającej się od kwinty *g*, a więc od *d′* albo od niższej oktawy tego ostatniego tonu, t. j. od *d*, musimy oprócz tonu *f* podwyższyć jeszcze *c′* na *cis′*, gama więc *d-dur* zawiera 2 krzyżyki—*fis* i *cis*; tak samo gama zaczynająca się od następnej kwinty, t. j. od *a*, zawiera 3 krzyżyki—*cis*, *fis* i *gis* i t. d. Gdy przy tem podwyższaniu coraz to nowych tonów przychodzimy nareszcie do *e* i *h*, to podwyższone tony tych ostatnich *eis* i *his* już bardzo mało się różnią od tonów *f* i *c′*. Instrumenty klawiszowe o gotowych już tonach nie dozwalają wcale wyrazić tej różnicy: na fortepianie naprzykład *f* służy zarazem jako *eis*, a *c′* jako *his*; natomiast w instrumentach, których tony muszą dopiero być wytwarzane (np. skrzypce) oraz przy śpiewie tony rzeczone—*eis* i *f* oraz *his* i *c*—są różne, co przy dokładnem wykonywaniu utworów muzycznych zawsze bywa uwzględniane.

Gdybyśmy z tonów gamy *c-dur* ułożyli gamę dla kwarty *c*, t. j. *f* jako primy, to otrzymalibyśmy następujące przestanki:

f‿g‿a‿h‿c′‿d′‿e′‿f′
1 1 1 $^1/_2$ 1 1 $^1/_2$

Widzimy, iż przestanek między *a* i *h* jest o $^1/_2$ tonu za duży, zaś między *h* i *c'*—o $^1/_2$ tonu za mały; chcąc przeto otrzymać dla gamy *f-dur* ten sam szereg przestanków, co i dla gamy *c-dur*, należy ton *h* obniżyć o $^1/_2$ tonu; powstający przez to ton nazywa się *b* tak, że gama *f-dur* przedstawia się jak następuje:

f — g — a — b — c' — d' — e' — f'
1 1 $^1/_2$ 1 1 1 $^1/_2$

Tak samo, obierając za ton zasadniczy gamy kwartę *f*, t. j. *b*, należy obniżyć ton *e* i t. d. To obniżanie tonów oznaczamy przez t. zw. bemol ♭ i nadajemy obniżonym tonom nazwy, przyłączając do odnośnej litery zgłoskę *es* albo też tylko literę *s*; obniżeniami naprzykład tonów *d*, *e*, *g* będą *des*, *es* i *ges*. I przy obniżaniu, podobnie jak przy podwyższaniu tonów, dochodzimy do takich, które bardzo zbliżają się do tonów, powstających inną drogą, np. *b* i *ais*, *es* i *dis*, *ces* i *h* i t. d., których na instrumentach klawiszowych nie możemy wcale odróżniać. Na fortepianie naprzykład czarny klawisz między *f* i *g* służy do wytwarzania zarówno tonu *fis* jak i *ges*, czarny klawisz między *c* i *d* służy dla tonów *cis* i *des* i t. d.

Gama, powstająca wskutek wstawienia 5 półtonów między tony gamy diatonicznej, obejmująca więc 12 półtonów, nazywa się *chromatyczną*. Na fortepianie wytwarzamy ją, uderzając kolejno klawisze białe i czarne, otrzymujemy wtedy tony *c*, *cis*, *d*, *dis*, *e*, *f*, *fis*, *g*, *gis*, *a*, *ais*, *h*, *c'*, *cis'* i t. d. Gama ta zawiera szereg nowych przestanków, które rozróżniamy jako wielkie i małe. Na szczególną uwagę zasługują tony, powstające wskutek podwyższenia secundy $^9/_8$ i kwinty $^3/_2$ o półton $^{16}/_{15}$. Do tonu zasadniczego są one w stosunkach $^9/_8 \times ^{16}/_{15}$ czyli $^6/_5$ i $^3/_2 \times ^{16}/_{15}$ czyli $^8/_5$. Z powodu prostoty tych stosunków, rzeczone tony są jeszcze zgodne z tonem zasadniczym i, różniąc się bardzo mało od tercyi i sexty, stanowią ich obniżenia, dlatego też nazywamy je *małą tercyą* i *małą sextą*. Gama, w której zamiast tercyi i sexty znajduje się mała tercya i mała sexta, brzmi bardziej ciemno i ponuro, niż gama *dur* i nazywa się *gamą moll*.

Pozostaje nam powiedzieć jeszcze kilka słów o wyrównaniu nastroju różnych tonów. Przypuśćmy, iż zaczynając od *c*, stroimy fortepian według czystych kwint tak jednak, że za każdym razem, gdy odnośny ton przypada w raz przekreślonej oktawie, bierzemy zamiast niego ton o oktawę niższy: kwinta np. *g* przypada na *d'*, zamiast tego tonu bierzemy *d*, kwinta *a* przypada na *e'* zamiast tego bierzemy ton *e* i t. d. Przy tworzeniu więc każdej nowej kwinty, musimy wtedy częstość drgań poprzedniego tonu mnożyć przez $^3/_2$, przy każdem zaś cofaniu się o oktawę, otrzymany rezultat dzielić przez 2. Oznaczywszy częstość drgań tonu *c* przez 1, otrzymamy dla innych tonów następujące liczby drgań:

$$c = 1$$
$$g = \frac{3}{2}$$
$$d' = \frac{9}{4}\quad d = \frac{9}{8}$$
$$a = \frac{27}{16}$$
$$e' = \frac{81}{32},\quad e = \frac{81}{64}$$
$$h = \frac{243}{128}$$
$$fis' = \frac{729}{256},\quad fis = \frac{729}{512}$$
$$cis' = \frac{2187}{1024},\quad cis = \frac{2187}{2048}$$
$$gis = \frac{6561}{4096}$$
$$dis' = \frac{19683}{8192},\quad dis = \frac{19683}{16384}$$
$$ais = \frac{59049}{32768}$$
$$eis' = \frac{177147}{65536},\quad eis = \frac{177147}{131072}$$
$$his = \frac{531441}{262144}$$

Ponieważ jednak *his* jest zarazem *c'*, postępując więc rzeczoną drogą, otrzymalibyśmy dla oktawy *c*, t. j. dla tonu *c'* częstoś drgań $\frac{531441}{262144}$, to jest więcej niż 2 razy tak dużą, jak dla *c*, ton ten byłby tedy za wysoki. Chcąc przeto otrzymać czystą oktawę

i jednocześnie równomiernie traktować wszystkie kwinty, musimy każdą kwintę brać nieco niżej, mianowicie zamiast odpowiadającego jej przestanku $^3/_2$ czyli 1,5, należy wziąć nieco mniejszy stosunek 1,4983, zwany stosunkiem *temperowanej kwinty*. Zmiany, jakie należy porobić w różnych tonach, aby otrzymać jak najczystsze przestanki, nazywamy temperaturą. W dzisiejszej muzyce powszechnie używają *temperatury jednostajnej*, w której wszystkie oktawy są naturalnie czyste (t. j. każdej bezpośrednio wyższej oktawie jakiegoś tonu odpowiada dokładnie 2 razy większa częstość drgań, niż temu tonowi) i 12 tonów gamy chromatycznej mają równe przestanki. Przy takim nastroju, bardzo łatwo przechodzić z jednej tonacyi w inną, nie zmieniając przestanków kwart, kwint i t. d.

Znając wartości różnych przestanków, możemy łatwo obliczyć absolutne częstości drgań dla wszystkich tonów muzycznych, jeżeli dana jest absolutna częstość drgań, odpowiadająca jednemu, jakiemukolwiek tonowi całej skali. Przyjęto stroić różne instrumenty muzyczne według tonu *a'*, którego wysokość oznacza się za pomocą stroika i syreny. Jednakże wysokość tonu *a'* stroika w różnych miejscach i czasach była i jest rozmaitą. We Francyi od r. 1859 postanowiono, ażeby liczba drgań stroika o tonie *a'* wynosiła 435. Według tego nastroju otrzymujemy naprzykład dla tonu *c* oraz niższych i wyższych jego oktaw następujące częstości drgań:

$\underline{\underline{C}}$	$\underline{C}$	C	c	c'	c''	c'''	c''''
16,31	32,62	65,25	130,5	261	522	1044	2088

§ 6. Optyczne metody badania drgań dźwiękowych.

Oprócz wymienionych w 1 § niniejszego rozdziału metod badania drgań dźwiękowych, istnieje jeszcze jedna—optyczna metoda, zbyt ważna, abyśmy ją mieli tu pominąć, zobaczymy bowiem, że przy jej pomocy nawet głuchy może nastrajać widełki do *unissono* albo do jakiegobądź dowolnego interwalu z taką do-

kładnością, jakiejby nie mógł osiągnąć człowiek, obdarzony najdelikatniejszym nawet słuchem, lecz przytem ślepy.

Za właściwego twórcę tej metody uważać należy fizyka angielskiego Tomasza Younga, który unaoczniał węzły i pętlice drgającego wypolerowanego drutu, rzucając na różne jego punkty silne światło. Punkty te opisują wtedy w powietrzu różne płomieniste linie, które wydają się nam ciągłemi dlatego, że oko, podobnie jak i ucho, zachowuje przez pewien czas doznane wrażenie, wskutek czego oddzielne obrazy świecącego punktu, szybko zmieniającego swe położenie w przestrzeni, zlewają się dla nas w jednę ciągłą linię, tak samo jak szybko następujące po

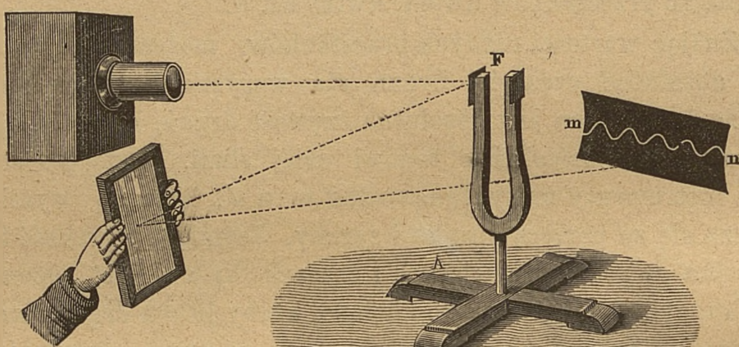


Fig. 219. Zasada optycznej metody Lissajous, służącej do badania drgań strołków.

sobie uderzenia zlewają się dla ucha w ciągły ton. Na tej samej zasadzie polega wynaleziony przez Wheatstona w r. 1827 przyrząd, zwany *kaleidofonem*. Składa się on z szeregu elastycznych sztab metalowych o prostokątnym przekroju, przytwierdzonych w jednym końcu i opatrzonych na drugim swobodnym końcu posrebrzoną kulką, na którą rzucamy silne światło. Gdy przez stosowne uderzenia wprawimy podobną sztabę w poprzeczne drgania tak, aby odbywały się one jednocześnie w kierunkach obu średnic jej przekroju, wtedy świecąca kulka opisuje węzłowatą linię, której kształt zmienia się wraz ze zmianą stosunku częstości drgań, wykonywanych przez sztabę w jednym i drugim kierunku.

W nowszych czasach Lissajous znakomicie ulepszył tę metodę, używając jako ciał dźwięczących—dużych stroików o ramionach nie równoległych, lecz górnemi końcami nieco nachylonych ku sobie. Niejeden zapewne z czytelników śledził przesuwanie się świetlnego punktu po ścianie lub suficie, gdy obracał on zlekka zwierciadło, na które padała wiązka promieni słonecznych. Otóż proste to doświadczenie stanowi podstawę optycznej metody Lissajous, którą dokładniej unaocznia figura 219. Zauważywszy, że odbijanie się światła podlega temu samemu prawu, co i odbijanie się dźwięku (patrz str. 242), łatwo zrozumiemy doświadczenia, jakie można wykonywać ze stroikiem o nachylonych nieco ku sobie ramionach, z których jedno opatrzone jest małem zwierciadłem *F*, drugie zaś, dla równowagi, obciążone jest stosownym balastem. Gdy promień światła lampy, skierowany na zwierciadło *F*, zostaje przez nie odrzucony ku drugiemu zwierciadłu, które trzymamy w ręku, i gdy po odbiciu od tego ostatniego promień pada na ciemny ekran, wtedy mogą zajść różne wypadki, z których rozważymy tylko 4 następujące: 1) Gdy widełki oraz zwierciadło, trzymane w ręku, które odtąd będziemy nazywali dużem, zostają w spoczynku, wtedy na ekranie otrzymujemy jeden świetlny punkt, a raczej mały świetlny krążek. 2) Gdy stroik, a wraz z nim zwierciadełko *F* drga, duże zaś zwierciadło nie zmienia swego położenia, na ekranie powstaje prosta pionowa świetlna linia, której rozmiary, przy stałej odległości ekranu od widełek, zależą tylko od amplitudy drgania tych ostatnich. 3) Jeżeli podczas drgań stroika będziemy zlekka obracali duże zwierciadło naokoło poziomej osi, to na ekranie również utworzy się pionowa linia prosta, dluższa jednak albo krótsza, niż w poprzednim wypadku, zależnie od tego, czy ruchy dużego zwierciadła są więcej lub mniej zgodne z ruchami zwierciadełka *F*. 4) Gdy natomiast podczas drgań stroika będziemy duże zwierciadło zlekka obracali naokoło pionowej osi, naprzykład z lewa na prawo, to na ekranie otrzymamy poziomą falową linię *m n*, której każde dwa wygięcia odpowiadają jednej całkowitej oscylacyi stroika. Ten sam rezultat nastąpi także w razie, gdy zamiast obracać duże zwierciadło, będziemy przesuwali sam ekran z prawa na lewo.

2-gi i 3-ci z wymienionych wypadków możemy także wywołać, jeżeli, zamiast trzymać zwierciadło w ręku, przyczepimy je również do stroika, który względem drugiego stroika może zajmować jakiekolwiek położenie. W ten sposób Lissajous kombinował dwa drgające ruchy, równoległe albo prostopadle do siebie, o jednakowym lub różnym peryodzie drgania i, dzięki takiemu urządzeniu, zdołał on kreślić płomieniste linie, charakteryzujące akordy, różne interwale muzyczne, współdźwięki, rozdźwięki, t. zw. kołysania i t. d.

Dla dokładniejszego przedstawienia poniżej omówionych doświadczeń, musimy poprzednio zwrócić uwagę na pewne zjawisko i wprowadzić nowy termin, którego dotąd nie używaliśmy. Gdy ciało jakieś, np. wahadło oscyluje, wtedy przy każdej całkowitej jego oscylacyi rozróżniamy 4 główne położenia, zwane *fazami*, przez które wahadło przechodzi kolejno i w jednakowych odstępach czasu, równych $^1/_4$ peryodu całej oscylacyi. Z początku np. znajduje się ono: 1) w skrajnem lewem położeniu, poczem oscylując na prawo, mija 2) położenie równowagi, następnie dosięga 3) skrajnego prawego położenia, poczem oscyluje na lewo, znowu przechodząc przez 4) położenie równowagi i dosięgłszy po raz drugi skrajnego lewego położenia, kończy pierwszą oscylacyę, po której następuje druga, trzecia i t. d. z takiemiż fazami. W podobny sposób możemy rozróżnić 8 faz, następujących po sobie w jednakowych odstępach czasu, równych $^1/_8$ peryodu całej oscylacyi. Gdy wprawiamy w kołysania dwa wahadła równej długości, a więc o jednakowym peryodzie oscylacyi, wtedy może się zdarzyć, że oba znajdują się w jednakowych fazach, t. j. że oba naprzykład oscylując w tę samą stronę, przechodzą jednocześnie przez położenie równowagi, albo że oba jednocześnie dosięgają skrajnego lewego lub prawego położenia; powiadamy wtedy, że różnica ich faz równa się 0. Wahadła atoli mogą znajdować się także we wręcz przeciwnych fazach, gdy oba naprzykład oscylując w kierunkach przeciwnych, jednocześnie przechodzą przez położenie równowagi, albo gdy jedno z nich dosięga skrajnego lewego położenia, drugie zaś jednocześnie dosięga skrajnego prawego, lub naodwrót; wypadek ten wy-

rażamy, mówiąc, że różnica faz wahadeł równa się $1/2$ całej oscylacyi. Nareszcie jedno wahadło może wyprzedzać drugie o $1/8$, $1/4$, $3/8$, $5/8$, $3/4$ lub $7/8$ oscylacyi i wtedy tym samym ułamkiem oznaczamy różnicę ich faz. Po krótkim namyśle przekonamy się, że jeżeli wahadła rozpoczynają swe kołysania od tej samej fazy, to w wypadku *zupełnej* zgodności ich peryodów oscylacyi, będą się one zawsze znajdowały w jednakowych fazach. Przeciwnie, gdy peryody oscylacyi nie są zupełnie równe, wtedy różnica faz między obu wahadłami, równająca się w początku oscylacyi 0, staje się coraz większą i wreszcie równą 1 całej oscylacyi. W tym ostatnim momencie otrzymamy znowu koincydencyę (1) faz, (dwa bowiem wahadła, różniące się o *całą* liczbę oscy-

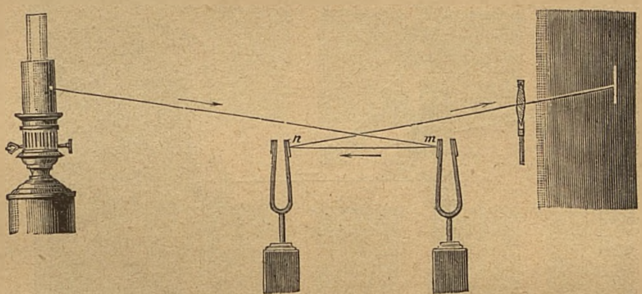


Fig. 220. Złożenie 2 drgających ruchów o kierunkach równoległych.

lacyj, znajdują się oczywiście w jednakowych fazach), która jednak w następnej chwili zostaje w powyższy sposób naruszona i t. d. To, cośmy powiedzieli o kołysaniach wahadeł, stosuje się w równej mierze do każdego innego ruchu oscylacyjnego, do cząstek falującej wody, do drgań strun, słupów powietrza, widełek strojowych i t. d.

W celu skombinowania oscylacyj, zachodzących w kierunkach równoległych, ustawia się dwa stroiki, opatrzone zwierciadłami, jeden naprzeciw drugiego, jak to pokazuje fig. 220. Wiązka promieni światła, wysyłanego przez stosowną lampę, po

---

(1) Patrz metodę koincydencyj w rozdziale o wahadle, str. 47.

odbiciu się od obu zwierciadeł m, n i po przejściu przez zbierającą soczewkę, kreśli na ekranie obraz małego otworu lampy, z którego wychodzi światło.

Przypuśćmy, że peryody drgań stroików są jednakowe. Gdy oba są w spoczynku, wtedy na ekranie powstaje świetlny krążek; jeżeli jeden tylko stroik drga, rzeczony obraz wydłuża się w pionową prostą linię; wprawmy nareszcie oba stroiki w drgania, a otrzymamy na ekranie również prostą linię, która będzie najdłuższą w razie, gdy stroiki znajdują się w jednakowych fazach [1], najkrótszą zaś—przy wręcz przeciwnych fazach oscylacyi. Z tego, cośmy wyżej powiedzieli o wahadłach, wynika

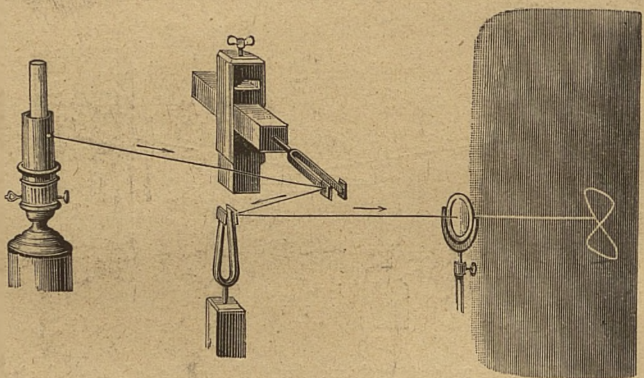


Fig. 221. Złożenie 2 drgających ruchów o kierunkach prostopadłych do siebie.

nadto, że w razie zupełnie jednakowych peryodów drgania obu stroików, długość świetlnej linii na ekranie pozostaje stałą dopóty, dopóki amplitudy ich oscylacyj się nie zmieniają. Jeżeli natomiast przez przyklejenie kawałka wosku przestroimy jeden stroik tak, ażeby spóźniał się on nieco względem drugiego, wtedy długość świetlnej linii, rzuconej na ekran, peryodycznie się zmienia, stając się największą przy każdej koincydencyi faz, najmniejszą zaś przy każdem przeciwieństwie faz oscylacyi obu

---

(¹) To jest, gdy ramiona każdego stroika jednocześnie zbliżają się ku sobie i jednocześnie oddalają się od siebie, czyli gdy ramię m oscyluje na prawo, to jednocześnie ramię n drga na lewo i naodwrót.

stroików. Zobaczymy później, jak skorzystano z tego przy optycznem przedstawieniu t. zw. kołysań dźwięku.

Przy powyższem urządzeniu otrzymalibyśmy prostą pionową linię świetlną i wtedy także, gdyby częstość drgań jednego stroika była 2, $^3/_2$, $^5/_4$ i t. d. razy większa, niż drugiego, to jest gdyby tony ich różniły się o oktawę, kwintę, tercyę i t. d. W ten sposób trudno więc byłoby rozróżniać interwale muzyczne. Rzecz się jednak zmieni, gdy stroiki umieścimy prostopadle jeden do drugiego tak, jak to pokazuje fig. 221 (str. 336). Jeżeli przy takim układzie drga tylko stroik poziomy albo tylko stroik pionowy, widzimy na ekranie prostą świetlną linię, w pierwszym wypadku — poziomą, w drugim zaś — pionową. Gdy zaś oba stroiki drgają, wtedy promień światła, odbity od obu zwierciadeł, drgając jednocześnie w kierunku pionowym i poziomym, kreśli na ekranie pochyłą prostą linię, albo też krzywą, której kształty zależą od stosunku częstości drgań użytych stroików.

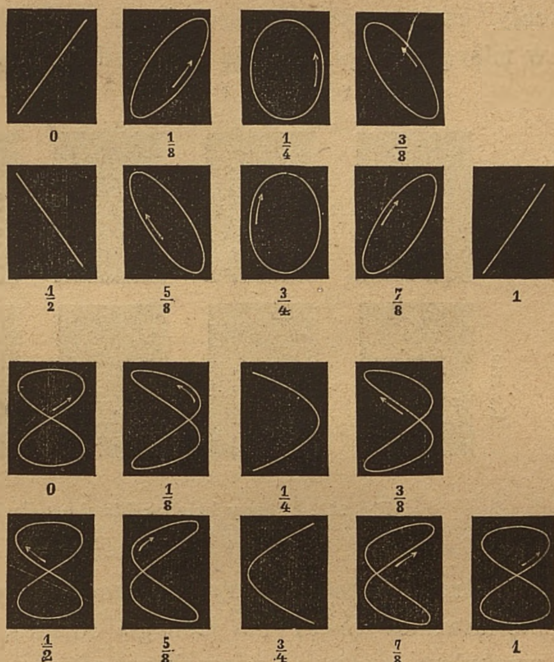


Fig. 222 i 223. Figury świetlne Lissajous dla primy (222) i oktawy (223).

Figura 222 przedstawia różne kształty obrazu świetlnego, rzuconego na ekran w wypadku, gdy stroiki—poziomy i pionowy brzmią w *unissono*. Jeżeli różnica ich faz równa się 0, wtedy odbity od zwierciadeł obu stroików promień świetlny kreśli na

ekranie pochyłą prostą linię, stanowiącą przekątnę prostokąta, którego boki równają się amplitudom drgań stroików. Linia ta przechyla się na lewo przy różnicy faz równej $^1/_2$ oscylacyi, przy innych zaś różnicach faz przyjmuje postać nachylonej lub prostej elipsy, która nareszcie przy różnicy faz, równej 1 całej oscylacyi, znowu przechodzi w pierwotną prostą linię. Kształt świetlnej linii warunkuje się jedynie początkową różnicą faz stroików i jeżeli peryody ich drgań są *dokładnie równe*, różnica ta stale się utrzymuje, świetlna zaś linia nie zmienia swego kształtu przez cały czas oscylacyi stroików i staje się tylko coraz mniejszą w miarę zmniejszania się amplitud ich drgań. W razie natomiast,

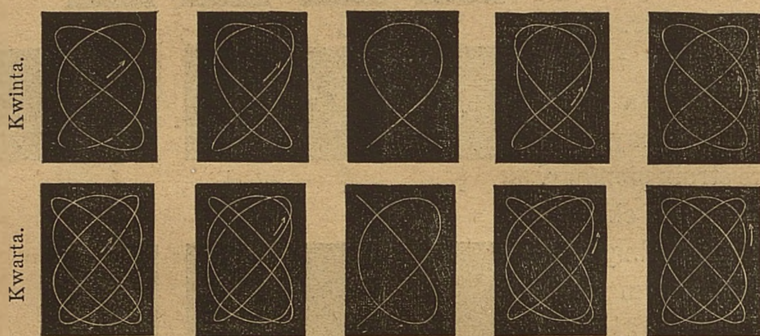


Fig. 224. Figury świetlne Lissajous dla kwinty i kwarty.

gdy stroiki drgają niezupełnie zgodnie, gdy np. przez przyklejenie kawałka wosku do jednego stroika, przestroimy go nieco względem drugiego, początkowa różnica faz nie może się utrzymać, lecz przybiera coraz to inną wartość, wskutek czego obraz świetlny zmienia się, przyjmując kolejno kształty, przedstawione na fig. 222.

Fig. 223 przedstawia różne kształty obrazu świetlnego na ekranie, gdy stroik pionowy wykonywa w tym samym czasie 2 razy więcej drgań, niż poziomy, t. j. gdy pierwszy wydaje ton o oktawę wyższy, niż drugi. Cyfry, pomieszczone pod oddzielnemi liniami, oznaczają odpowiadające im różnice faz stroików. Na fig. 224 widzimy różne kształty świetlnych linij dla kwinty

(gdy pionowy stroik wykonywa w tym samym czasie $^3/_2$ razy więcej drgań, niż poziomy) i dla kwarty (gdy stosunek częstości drgań stroika pionowego do częstości drgań poziomego jest jak 4 : 3). Tak samo każdy inny interwal muzyczny charakteryzuje obraz świetlny odmiennego kształtu, wskutek czego możemy za pomocą opisanej tu metody oznaczyć stosunek częstości drgań dwóch stroików daleko dokładniej, niż przy posługiwaniu się samym tylko słuchem, najbardziej nawet czułym na różnice wysokości tonów. Jeżeli np. dwa stroiki, brzmiące w *unisono*, dają

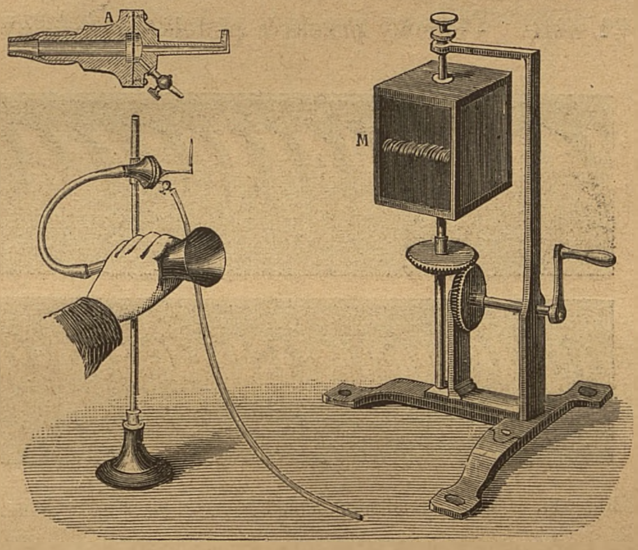


Fig. 225. Zasada optycznej metody Koeniga dla badania drgań gazu.

jednę z linij, przedstawionych na fig. 222, która zawsze zachowuje swój kształt, zależny od różnicy faz stroików, to wystarcza cokolwiek ogrzać jeden z nich, aby linia ta po kolei przyjmowała postacie, nakreślone na rzeczonej figurze: doskonałość współdźwięku stroików została naruszona, chociaż ucho nie jest w stanie odczuć tak drobnej różnicy.

Opisana wyżej optyczna metoda badania drgań dźwiękowych, dająca się stosować tylko do poprzecznie drgających ciał stałych, znajduje uzupełnienie w pięknej metodzie Koeniga,

dozwalającej optycznie przedstawiać drgania słupów gazu i polegającej na tem, że drgania takie udzielone zostają płomykom palącego się gazu oświetlającego, które migotaniem swem zdradzają wysokość tonu, a raczej interwal jego względem innego tonu—zasadniczego. W tym celu dzieli się pudełko za pomocą cienkiej elastycznej błony na 2 przedziały (fig. 225), z których jeden (na figurze prawy), opatrzony palnikiem, zasilany jest gazem oświetlającym, doprowadzanym ze zbiornika przez rurę kauczukową, drugi zaś (na fig. lewy) łączy się za pomocą kauczukowej rury z lejkowatem naczyniem, przed otworem którego śpiewamy tę lub ową nutę. Pionowy przekrój pudełka przedstawiony jest

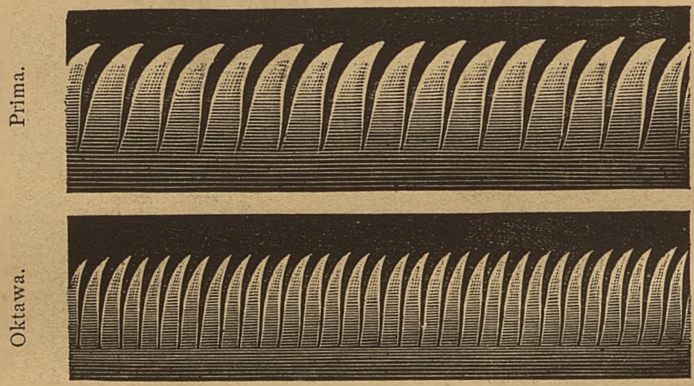


Fig. 226. Obrazy płomieni manometrycznych dla primy i oktawy.

oddzielnie w *A*. Zgęszczenia fal dźwiękowych, wpływających do lewego przedziału pudełka, wyginają rzeczoną błonę na prawo i zgęszczają gaz, znajdujący się w prawym przedziale; podczas rozrzedzeń zaś fal dźwiękowych, błona wygina się na lewo, przez co rzeczony gaz zostaje rozrzedzony tak, że płomień [1] palnika wydłuża się i kurczy rytmicznie ze zgęszczeniami i rozrzedzeniami fal dźwiękowych, najdokładniej w ten sposób odtwarzając drgania brzmiącego ciała lotnego. Dla lepszego unaocznienia

---

([1]) Płomienie takie nazywają się manometrycznemi; posłużyliśmy się już niemi do wykazania węzłów i brzuszków w piszczałce (patrz str. 318).

tych zmian płomyka, Koenig używa tego samego sposobu, co i Lissajous: ustawia on mianowicie przed płomykiem zwierciadło *M* o 4 ścianach, które za pomocą systemu kół zębatych można wprawiać w mniej lub więcej szybki, lecz jednostajny ruch obrotowy. Czyniąc to, widzimy w zwierciedle szereg płomienistych

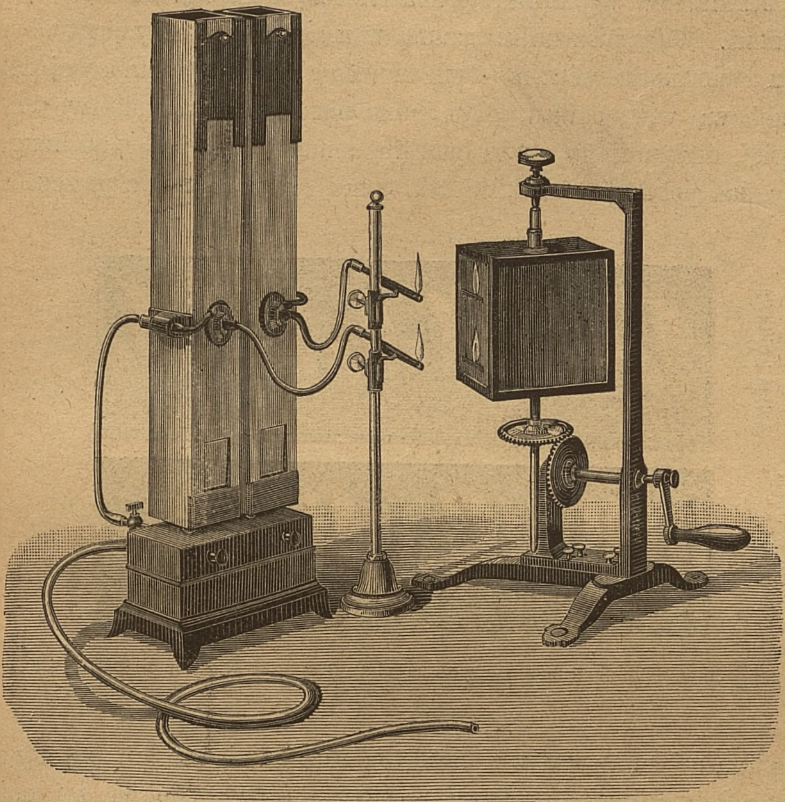


Fig. 227. Optyczne przedstawienie drgań powietrza w piszczałkach.

zębów, przedzielonych ciemnemi lukami, albo też świetlną smugę, której górny brzeg rozdzielony jest na zęby, znajdujące się w równych od siebie odstępach. Jeżeli w pobliżu otworu lejkowatego naczynia zaśpiewamy jakąś nutę, a potem jej oktawę, to przy obracaniu zwierciadła płomieniste obrazy 2 tych tonów przedstawią się tak, jak pokazuje fig. 226: na każdy świetlny ząb dla primy przypadają 2 świetlne zęby dla oktawy.

Dla optycznego przedstawienia drgań powietrza w piszczałkach, Koenig łączy z powyżej opisanemi pudełkami te miejsca piszczałek, w których przypadają węzły, palniki zaś, komunikujące z pudełkami za pomocą rurek kauczukowych, ustawia jeden ponad drugim tak, że w zwierciedle widzimy jednocześnie obrazy wszystkich,—w wypadku, przedstawionym na fig. 227 dwóch—płomieni. Gdy piszczałki brzmią w *unissono*, wtedy przy obracaniu zwierciadła widzimy dwie świetlne smugi o jednakowej liczbie zębów; w wypadku, gdy jedna piszczałka daje oktawę tonu drugiej, otrzymujemy dwie świetlne smugi, jednę po nad drugą, takie, jak pokazuje fig. 226; tak samo, gdy jedna z piszczałek

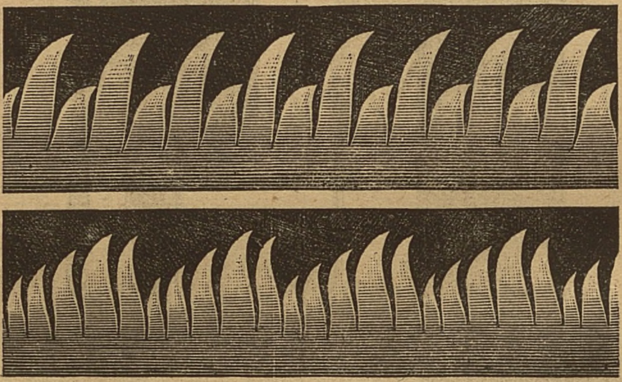


Fig. 228. Obrazy płomieni manometrycznych dla primy i oktawy oraz dla primy i tercyi.

daje ton o kwintę wyższy, niż ton drugiej piszczałki, wtedy na każde 2 świetlne zęby smugi, odpowiadającej tonowi tej ostatniej, otrzymamy 3 zęby dla tonu pierwszej piszczałki i t. d.

Jeszcze lepiej można porównywać z sobą wysokości tonów dwóch piszczałek, jeżeli połączymy obie rurki kauczukowe, wychodzące z ich pudełek, z jednym i tym samym palnikiem. Gdy obie piszczałki brzmią, wtedy płomień tego palnika drga zgodnie z oscylacyami powietrza, zawartego w jednej i drugiej piszczałce i otrzymujemy wtedy przy obracaniu zwierciadła jednę tylko świetlną smugę, której zazębienia zależą od stosunku częstości drgań obu piszczałek. Gdy np. jedna z nich daje ton o oktawę

wyższy, niż druga, to otrzymujemy smugę świetlną, w której pomiędzy każdemi 2 dłuższemi zębami przypada jeden krótszy; gdy zaś tony piszczałek różnią się o tercyę, to odnośna smuga świetlna składa się z grup o 5-ciu dłuższych i krótszych zębach (fig. 228).

ROZDZIAŁ IV.

Zasadnicze zjawiska fal dźwiękowych.

§ 1. Interferencya dźwięku.

Wykład nasz teoryi zjawisk dźwiękowych byłby niezupełny, gdybyśmy nie wyłuszczyli jeszcze jednego punktu, dotyczącego pytania, w jaki sposób dwa albo więcej systemów fal dźwiękowych mogą jednocześnie rozchodzić się w powietrzu, nie przeszkadzając sobie wzajemnie i nie wytwarzając chaosu. Czem się to dzieje, że podczas koncertu np., gdy najrozmaitsze instrumenty przesyłają nam fale dźwiękowe, krzyżowanie się tych ostatnich zlewa się jednak dla naszego ucha w harmonię, że możemy nawet odróżniać dźwięki oddzielnych instrumentów. Bracia Bernouilli i Euler rozstrzygnęli to pytanie na drodze teoretycznej, wykazując, że w jednym i tym samym środku mogą jednocześnie rozprzestrzeniać się i krzyżować z sobą różne ruchy oscylacyjne, nie przeszkadzając sobie wzajemnie. Nie możemy tu jednak przytoczyć matematycznych wywodów tych uczonych, nie posiadamy nadto żadnego sposobu unaoczniania zawiłych ruchów powietrza podczas krzyżowania się w niem różnych systemów fal. Uciekamy się przeto do procesu, analogicznego z rozprzestrzenianiem się dźwięku, mianowicie do rozchodzenia się i krzyżowania fal na powierzchni cieczy, dającego się już łatwo śledzić gołem nawet okiem.

Gdy na spokojną powierzchnię wody rzucamy 2 kamienie na niewielkiej od siebie odległości, wtedy wokoło każdego z punktów spadku kamieni powstaje system współśrodkowych, pierścieniowatych fal, z których każda składa się z wyniesienia i zagłę-

bienia, czyli *góry* i *dołu*. Po pewnym czasie, rozprzestrzeniające się coraz dalej fale obu systemów stykają się i zachodzą jedne na drugie, rozdzielając powierzchnię wody pomiędzy obu punktami spadku na małe wyniesienia i zagłębienia. Przypuśćmy, że amplitudy drgań cząstek wody w obu systemach fal są jednakowe; jakiż będzie skutek ich krzyżowania się? Tam, gdzie góra

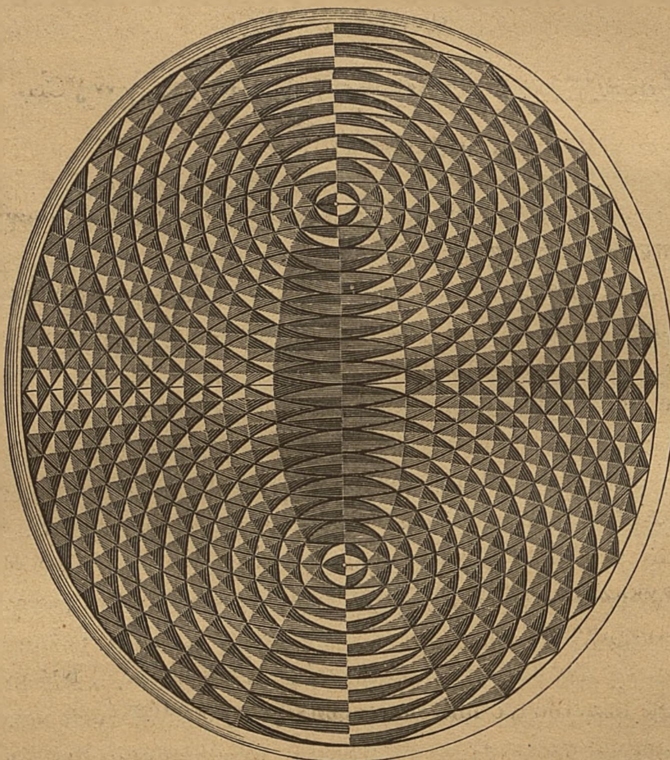


Fig. 229. Krzyżowanie się fal na powierzchni rtęci.

jednej fali zejdzie się z górą drugiej fali, woda podniesie się na podwójną wysokość, tam zaś, gdzie dół zejdzie się z dołem, zagłębienie będzie dwa razy większe, niż przy pojedyńczej fali; tam nareszcie, gdzie góra jednej fali zejdzie się z dołem drugiej, woda pozostanie na zwykłym swym poziomie. Widzimy, że oddzielne cząstki wody doznają jednocześnie impulsów, skierowa-

nych w tę samę stronę, w górę lub na dół, albo też w przeciwne strony; w pierwszym wypadku, zwanym koincydencyą, impulsy wzajemnie się wspomagają i odnośna cząstka wody wskutek tego silniej się podnosi albo obniża, w drugim zaś, zwanym interferencyą, impulsy całkowicie albo częściowo się zobojętniają i odnośna cząstka wody albo wcale, albo tylko nieznacznie wznosi się lub obniża. Rezultat ten *superpozycyi* czyli nakładania się drgań wyrażamy mówiąc, że *wypadkowy ruch każdej oddzielnej cząstki równa się sumie albo różnicy ruchów składowych.* Jestto ogólne prawo krzyżowania się fal, stosujące się zarówno do falowania wody, jak i rozchodzenia się dźwięku, światła, albo fal elektrycznych. I gdybyśmy zamiast 2, rzucili na wodę 10, 100 i więcej kamieni, to wypadkowy rezultat licznych współczesnych impulsów, nadawanych cząstkom wody, przekraczałby być może granice naszego postrzegania, lecz zawsze podlegałby rzeczonemu prawu.

Zjawisko krzyżowania się fal otrzymujemy także przy spotykaniu się fal postępowych z odbitemi; przedstawia się ono najwyraźniej na powierzchni rtęci. Fig. 229 daje nam zaledwie słabe wyobrażenie o piękności tego zjawiska: Jeżeli naczynie eliptycznego kształtu napełnimy rtęcią i spuścimy kroplę tej cieczy na punkt, w którym przypada jedno z ognisk elipsy, to naokoło tego punktu powstaną pierścieniowate fale, które, rozchodząc się na wszystkie strony, odbijają się od ścian naczynia i koncentrują w drugiem ognisku, z którego znowu się rozchodzą w postaci pierścieni, łączą w pierwszem ognisku i t. d., dopóki spuszczamy krople na jedno z ognisk. Pomimo krzyżowania się fal, wychodzących z rzeczonych punktów, możemy doskonale rozróżnić oba systemy fal.

Podobnie jak ciecze, tak i powietrze może przejmować naraz wiele ruchów oscylacyjnych i przeprowadzać drgania chociażby 1000 jednocześnie brzmiących instrumentów. Gdy próbujemy unaocznić sobie zachodzące przytem ruchy atmosfery, to wyobraźnia odmawia nam posłuszeństwa; pomimo to jednak powyższe prawo zachowuje swą siłę: Wypadkowy ruch każdej oddzielnej cząstki powietrza równa się sumie oddzielnych jednokierunko-

wych, albo różnicy różnokierunkowych ruchów składowych i może być rozłożony tylko na te ruchy składowe, z których powstał. Co zaś najbardziej zadziwia, to okoliczność, że pomimo, iż na ucho działa tylko słup powietrza o średnicy zaledwie kilku milimetrów, możemy jednak wyodrębniać oddzielne systemy fal dźwiękowych i przy pewnej uwadze i wprawie możemy odróżniać pojedyncze tony.

Rozważmy teraz nieco bliżej różne wypadki krzyżowania się fal. Wprawmy w drgania stroik, który dla odróżnienia od innego nazwijmy *A*: przesyła on przez powietrze szereg fal dźwiękowych. Ustawmy za nim inny drgający stroik—*B*, wtedy wychodzące z tego ostatniego fale będą przeciągały przez powietrze, rozfalowane już przez drgania pierwszego stroika. Otóż nietrudno pojąć, iż drgania obu stroików mogą zachodzić w ten sposób, że zgęszczenia fal jednego z nich zlewają się ze zgęszczeniami fal drugiego i że to samo zachodzi z rozrzedzeniami ich fal, będziemy wtedy mieli koincydencyę. Jeżeli wypadek ten ma miejsce, to oba stroiki wzajemnie się wspomagają i zarówno zgęszczenia, jak i rozrzedzenia powietrza będą daleko większe, niż w razie drgania jednego tylko stroika. Ponieważ zaś natężenie tonu zależy właśnie, jak wiemy, od wielkości tych zgęszczeń i rozrzedzeń, przeto dwa jednocześnie brzmiące stroiki w przyjętym tu wypadku dają ton o wiele intensywniejszy, niż jeden drgający stroik. Łatwo jednak zrozumieć, iż może zajść także taki wypadek, że gdy jeden z drgających stroików powoduje zgęszczenie, to drugi wywołuje rozrzedzenie, albo innemi słowy, gdy cząstki powietrza wskutek drgań jednego stroika usiłują posuwać się naprzód, to jednocześnie wskutek drgań drugiego stroika usiłują one cofać się w tył tak, że nastąpi interferencya. Jeżeli siły, działające na rzeczone cząstki w kierunkach wręcz przeciwnych, są sobie równe, wtedy cząstki te nie posuną się ani naprzód, ani w tył i w rezultacie tego nastąpi spoczynek powietrza, odpowiadający milczeniu, to jest brakowi wszelkiego dźwięku. Można tedy przez dodanie tonu jednego stroika do tonu drugiego wywołać milczenie. Zjawisko interferencyi lepiej, niż każde inne, charakteryzuje ruch falowy. Zoba-

czymy w następnej księdze, że przez dodanie światła do światła można w pewnych warunkach wytworzyć ciemność i rezultat ten stanowi jeden z najgłówniejszych dowodów na korzyść teoryi falowania światła. Prawie w tym samym czasie, gdy rozpoczęliśmy opracowanie niniejszego dzieła, wykazano zjawiska interferencyi przy rozprzestrzenianiu się działań elektrycznych, musimy przeto przyjąć, że te ostatnie także polegają na falowaniach pewnego środka.

Zobaczmy jednak, przy jakich warunkach następuje koincydencya czyli zlewanie się i interferencya czyli znoszenie się fal dźwiękowych. Niechaj 2 stroiki *A* i *B*, brzmiące w *unissono*, drgają zawsze w jednakowych fazach, t. j. tak, że jednocześnie oba ramiona każdego stroika zbliżają się ku sobie i jednocześnie oddalają się od siebie. Dla uproszczenia zadania, weźmy pod

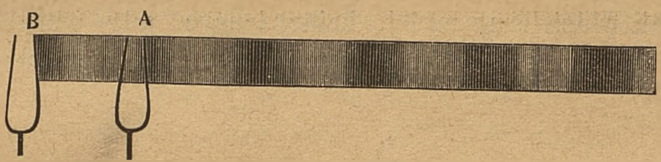


Fig. 230. Koincydencya fal dźwiękowych.

uwagę tylko prawe ich ramiona (fig. 230). Przy jakiej odległości ramion *A* i *B* następuje zlanie się zgęszczeń i rozrzedzeń—oznaczonych na figurze przez silniej i słabiej cieniowane miejsca—fal obu stroików. Po pewnym namyśle przekonamy się, że ma to miejsce wtedy, gdy odległość między temi ramionami równa się długości 1 całej fali, odpowiadającej wydawanemu przez stroiki tonowi, albo gdy odległość ta równa się długości 2, 3, 4 i t. d., albo jakiejkolwiek innej liczby całych fal. Zarówno zgęszczenia, jak i rozrzedzenia będą na całej drodze, którą przebiega dźwięk, silniejsze, wskutek czego usłyszymy także o wiele donośniejszy ton, niż w razie, gdybyśmy jeden ze stroików usunęli na stronę.

Cóż tedy nastąpi, gdy *A* oddalone jest od *B* tylko na długość pół fali? Wtedy oczywiście zgęszczenia jednego systemu

fal zlewają się z rozrzedzeniami drugiego systemu fal i otrzymamy interferencyę: Powietrze na prawo od *A* będzie wszędzie w spoczynku, jak to pokazuje fig. 231, na której jednostajność cieniowania ma oznaczać brak zgęszczeń i rozrzedzeń; jeżeli przytem amplitudy drgań obu stroików są sobie zupełnie równe, to w rozważanym tu wypadku nie usłyszymy żadnego tonu. Przy odległości między ramionami, równej długości 2 pół-fal, otrzy-

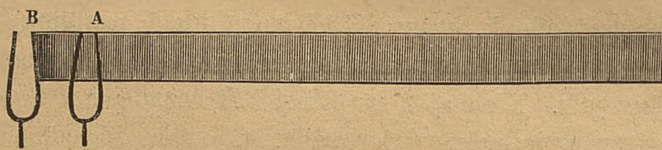


Fig. 231. Interferencya fal dźwiękowych.

mamy, jak widzieliśmy wyżej, koincydencyę, gdy odległość ta równa się długości 3 pół-fal, nastąpi znowu interferencya i t. d.

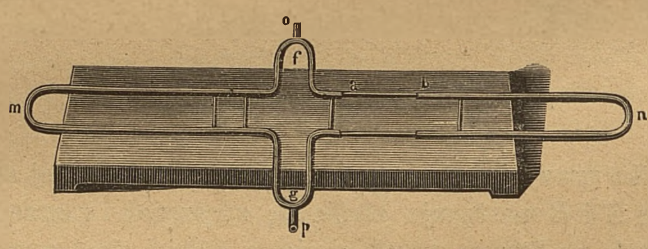


Fig. 232. Doświadczalne stwierdzenie prawa koincydencyi i interferencyi fal dźwiękowych.

Albo, ogólniej się wyrażając, *otrzymamy koincydencyę obu systemów fal, gdy odległość między ramionami stroików albo między jakiemikolwiek dwoma ciałami dźwięczącemi, brzmiącemi w unissono, równa się parzystej liczbie długości pół-fali, interferencyę zaś, gdy odległość ta równa się nieparzystej liczbie długości pół-fali.* Podobne prawo stosuje się także do fal świetlnych i elktrycznych.

Rzeczone prawo możemy stwierdzić za pomocą nader prostego doświadczenia, proponowanego już dawniej przez Johna

Herschla i urzeczywistnionego w nowszych czasach przez Quinckego i Koeniga. Polega ono na tem, że rozdzielamy system fal, wychodzących z ciała dźwięczącego, na dwa prądy nierównej długości, które, będąc znowu połączone, interferują z sobą. Fig. 232 przedstawia przyrząd, używany do podobnych doświadczeń: Rura *o f* rozgałęzia się w *f* na dwa ramiona *f a b n g* i *f m g*, które przy *g* znowu łączą się z sobą w jeden wspólny kanał *g p*. Część *b n* rury daje się wysuwać tak, że możemy nadawać różną długość ramionom prawemu i lewemu, przez które rozprzestrzeniają się wstępujące do rury przy *o* fale dźwiękowe. Zbliżmy do otworu *o* drgający stroik, do *p* zaś—ucho, wtedy, w razie jednakowej długości ramion rury, fale dźwiękowe, rozchodzące się jednocześnie przez oba ramiona, dosięgną w tym samym czasie naszego ucha i usłyszymy wyraźnie ton stroika. Wyciągajmy teraz część *b n* rury, a osiągniemy wreszcie długość, przy której ton stroika ucicha; następuje to wtedy, gdy całe prawe ramię rury jest dłuższe od lewego o $1/2$ długości fali, odpowiadającej tonowi stroika, t.j. gdy długość *ab* równa się $1/4$ długości takiej fali. Przy dalszem wyciąganiu części *b n* rury, słyszymy coraz to lepiej rzeczony ton i gdy różnica długości obu ramion równa się długości całej fali, ton ten rozbrzmiewa tak silnie, jak w początku doświadczenia, poczem przy dalszem wysuwaniu *b n*, ton znowu słabnie i zupełnie ucicha przy różnicy długości ramion równej potrójnej długości pół-fali, następnie dosięga maximum natężenia, gdy różnica ta równa się poczwórnej długości pół-fali i t. d. Otrzymujemy więc, jak tego wymaga powyższe prawo, koincydencyę albo interferencyę fal, zależnie od tego, czy różnica dróg, jakie przebywa dźwięk, równa się parzystej czy nieparzystej liczbie pół-fal. Jasną jest rzeczą, że za pomocą tego sposobu możemy oznaczyć długość fali, odpowiadającej danemu tonowi. W tym celu wystarcza znaleźć różnicę długości dróg, przy której następuje pierwsza zupełna interferencya; podwójna ta różnica równa się wtedy szukanej długości fali. Jeżeli oprócz tego znamy jeszcze odnośną częstość drgań, to na mocy znanego nam już twierdzenia (patrz str. 284) możemy obliczyć prędkość dźwięku w powietrzu.

Widzieliśmy, że w pewnych warunkach dwa ciała dźwięczące mogą się wzajemnie zobojętniać tak, iż ton ucicha. Z tego wynika, że jeżeli dwa różne ciała dźwięczące albo dwa odcinki jednego i tego samego ciała interferują z sobą, wtedy możemy wzmocnić ton, tamując ruch jednego z ciał lub odcinków. Jako przykład pierwszego wypadku może służyć okoliczność, że gdy w pewnych warunkach zatrzymamy ruchy jednego z dwóch zgodnie drgających stroików, umieszczonych na tem samem pudle rezonansowem, ton zostaje wzmocniony. Do przedstawienia drugiego wypadku najlepiej się nadaje płyta lub krążek. Wiemy już,

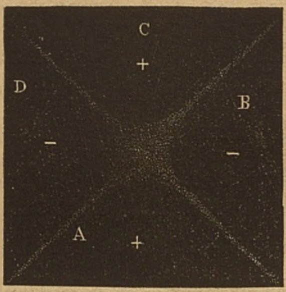


Fig. 233. Przeciwieństwo faz drgania dwóch przyległych odcinków płyty.

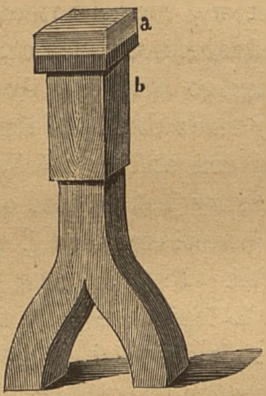


Fig. 234. Przyrząd Hopkinsa do wykazania przeciwieństwa faz oscylacyi dwóch przyległych odcinków płyty.

że dwa przylegające odcinki płyty lub krążka drgają zawsze w kierunkach przeciwnych—gdy jeden z nich oscyluje do góry, drugi jednocześnie idzie na dół i naodwrót, oraz że rozdzielająca je linia węzłowa oznacza miejsce, które zostaje w spoczynku, t. j. ani się podnosi, ani obniża.

W chwili, gdy jeden z odcinków—*A* (fig. 233) powoduje w znajdującem się nad nim powietrzu zgęszczenie, odcinek przyległy *B* lub *D* wywołuje w temże powietrzu rozrzedzenie, wskutek czego następuje interferencya i częściowe zniesienie tonu. Do wykazywania tego Hopkins posługiwał się rurą *b* (fig. 234), roz-

gałęziającą się u dołu na dwie nóżki i zakrytą u góry przez elastyczną błonę, posypaną piaskiem. Jeżeli trzymamy nóżki rury ponad dwoma przyległemi odcinkami płyty (fig. 233)—nad *A* i *B*, lub nad *A* i *D* i t. d., to piasek spokojnie leży na błonie dlatego, że w tym wypadku fale wysyłane przez oba odcinki, drgające w kierunkach przeciwnych, wzajemnie się znoszą z powodu przeciwieństwa faz. Jeżeli natomiast umieścimy nóżki rury ponad dwoma naprzemianległemi odcinkami—nad *A* i *C* albo *B* i *D*, to piasek zostanie zrzucony z błony, co dowodzi, że w tym razie zachodzi koincydencya faz oscylacyj odcinków: powietrze w rurze zostaje jednocześnie przez drgania obu odcinków zgęszczane i następnie rozrzedzane, wskutek czego silnie drgająca błona zrzuca znajdujący się na niej piasek.

Brak miejsca nie pozwala nam przytoczyć jeszcze innych nader ciekawych przykładów interferencyi dźwięku, ani też bliżej wyłuszczyć warunków, przy jakich wskutek krzyżowania się fal postępowych z odbitemi w samem ciele dźwięczącem powstają t. zw. *fale stojące*. Te ostatnie tworzą się wtedy, gdy fale poprzeczne albo podłużne, biegnąc wzdłuż struny, sztaby albo słupa gazu, odbijają się od stałej ściany albo od przytwierdzonego punktu i, wracając napowrót, spotykają się z nowemi falami, z któremi interferują; wskutek tego ciało dźwięczące dzieli się na oddzielnie drgające części, przedzielone węzłami tak, jak to pokazują fig 192, 201, 202, 205, 210 i t. d. Długość fali stojącej równa się połowie długości odnośnej fali postępowej; drgająca naprzykład jako całość struna przedstawia jednę poprzeczną stojącą falę, drgający zaś jako całość słup gazu, zawartego w zamkniętej z jednej strony rurze, przedstawia jednę podłużną stojącą półfalę. Różnica między falą postępową i stojącą polega na tem, że przy pierwszej cząstki środka kolejno jedna po drugiej przechodzą przez te same fazy, podczas gdy przy drugiej wszystkie drgające cząstki zawsze jednocześnie znajdują się w jednakowych fazach. Wszystkie cząstki np. drgającej jako całość struny jednocześnie dosięgają maximum odchylenia w jednę lub drugą stronę i jednocześnie przechodzą przez położenie równowagi, przyczem amplitudy drgań oddzielnych cząstek są różne, podczas

gdy przy fali postępowej amplitudy drgań różnych cząstek są jednakowe.

§ 2. Współdrganie i współbrzmienie. Kołysania dźwięku: uderzenia i pauzy. Tony kombinacyjne.

Sporządźmy sobie wahadło z ciężkiej kuli zawieszonej na sznurze i spróbujmy wprawić je w kołysania uderzeniami ręki. Jeżeli te ostatnie następują po sobie w odstępach czasu, ściśle równych peryodowi oscylacyi wahadła, to za pomocą szeregu nieznacznych nawet ruchów ręki możemy nadać wahadłu, chociażby bardzo ciężkiemu, regularne oscylacye o wielkiej amplitudzie; w przeciwnym razie ruchy ręki interferują z kołysaniami wahadła, wskutek czego oscyluje ono bardzo słabo i nieregularnie, albo też w pewnych warunkach zupełnie się zatrzymuje. W powyższym wypadku impulsy, zgodne z peryodem oscylacyi wahadła, udzielone mu zostają bezpośrednio; możemy to jednak zrobić także za pośrednictwem jakiegokolwiek stosownego środka: Zawieśmy naprzykład w pewnej od siebie odległości na tej samej poprzecznej belce dwa wahadła o jednakowym peryodzie oscylacyi i wprawmy w kołysania jedno z nich, a zobaczymy, że po niejakim czasie i drugie zacznie się kołysać z coraz to większą amplitudą. Impulsy przenoszą się tu za pośrednictwem massy belki z jednego, poruszonego wahadła na drugie i, nagromadzając się w tym ostatnim, zmuszają je w końcu do kołysania. Zjawisko to, zwane *współdrganiem*, możemy otrzymać także dla jakichkolwiek ciał oscylujących, jeżeli tylko peryody ich drgań są równe; gdy przytem te ostatnie są dosyć częste, to współdrganiu towarzyszy *współbrzmienie*, to znaczy, że ciało bezpośrednio nieporuszone, przejąwszy drgania drugiego ciała, samo zaczyna wydawać ton. Rozważmy kilka odnoszących się tu przykładów:

Naciągnijmy nad temi samemi podstawkami monochordu (patrz fig. 190, str. 288) dwie struny i, nastroiwszy je do *unissono*, umieśćmy na jednej z nich zgięty skrawek papieru (t. zw. konik), drugą zaś zarwijmy palcem. Rzeczony konik zleci ze

Довволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.

Cena 20 kop.

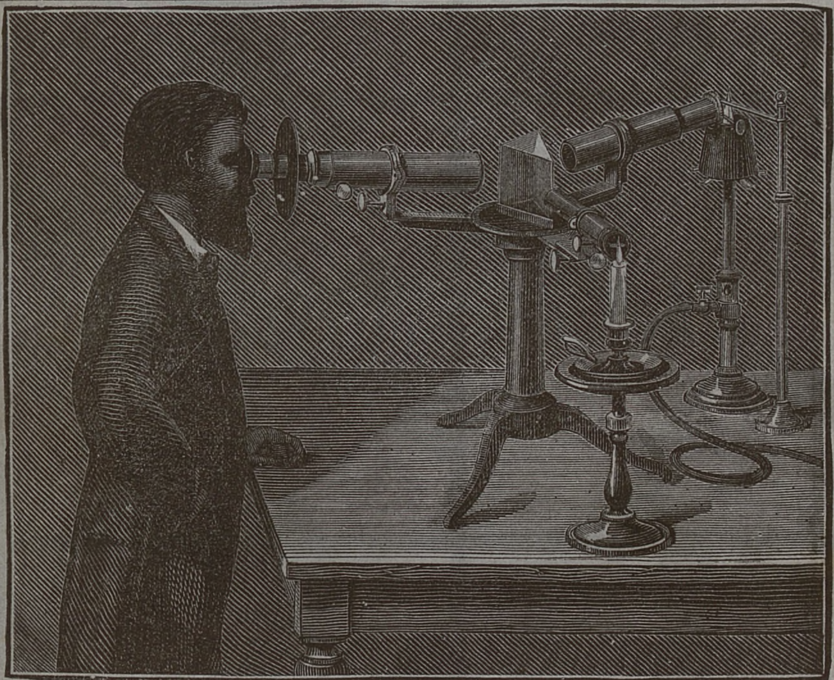
Zeszyt 12.

Cena 20 kop.

SIŁY PRZYRODY.

POPULARNY WYKŁAD FIZYKI

I GŁÓWNIEJSZYCH JEJ ZASTOSOWAŃ.



Spektroskop.

Podług dzieła A. Guillemin'a „Le monde physique"

OPRACOWALI

Józefowa Nusbaum

bak. n. prz.

i

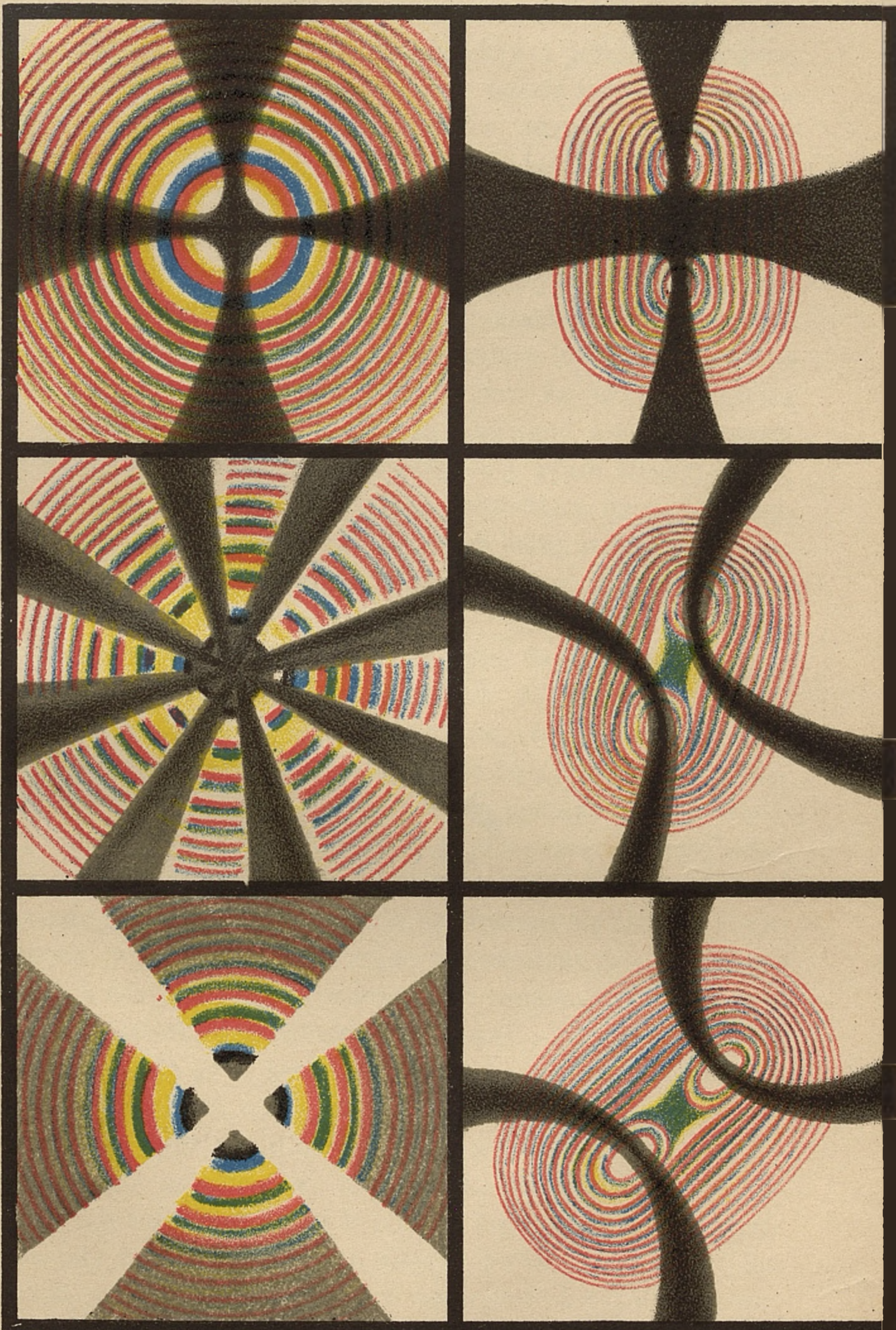
Henryk Silberstein

dr. fil., b. as. chem. przy un. w Bernie.

WARSZAWA.

Nakładem Księgarni **H. Olawskiego**, ul. Mazowiecka № 6.

1889.



w Lit. „Zofija" B. A. Bułaty Królewsk.

V. Pierścienie barwne

w jedno-i dwuosiowych, podwójnie załamujących światło kryształach.

struny, chociaż jej wcale nie dotknęliśmy i jeżeli zatamujemy ruch zarwanej struny, to odnośny ton będzie jednak nadal rozbrzmiewać; rolę przenosiciela impulsów odgrywają tu wspólne dla obu strun podstawki. Wszystkie doświadczenia z konikami, jakie przy opisie węzłów i pętlic strun (patrz str. 292) wykonaliśmy z jedną struną, możemy także powtórzyć z dwiema strunami, brzmiącemi w *unissono.* Podeprzyjmy naprzykład jednę z nich na $^1/_4$ długości, w różnych zaś punktach drugiej umieśćmy czerwone i niebieskie koniki, zaznaczające miejsca brzuszków pętlic i węzłów. Jeżeli teraz pociągniemy smyczkiem krótszą część podpartej struny, to wszystkie czerwone koniki umieszczone na brzuszkach drugiej, niepotrąconej wcale struny, zlecą, niebieskie zaś, które leżą na węzłach, pozostaną na swych miejscach. Gdy natomiast przestroimy nieco jednę strunę względem drugiej, to wskutek naruszenia zgodności drgań, koniki nie będą już zlatywały z niepotrąconej struny.

Wpływ zgodności drgań jeszcze lepiej daje się wykazać za pomocą dwóch kamertonów, nastrojonych do *unissono.* Jeżeli jeden z nich pociągniemy silnie smyczkiem, to i drugi, znajdujący się na pewnej odeń odległości, także zaczyna drgać i wydawać ton, o czem możemy się przekonać, tamując ruch potrąconego kamertonu palcami. Rolę środka, przenoszącego oscylacye, odgrywa w tym razie powietrze, a po części także drzewo pudeł rezonansowych, na których zwykle pomieszcza się stroiki. Drgający stroik wytwarza w otaczającem powietrzu fale, które we właściwych odstępach czasu uderzają o ramiona drugiego, spoczywającego stroika i działania tych uderzeń, nagromadzając się w nim, wprawiają go w końcu w drgania. Spoczywający stroik przejmuje, pochłania tylko drgania stroika albo innego ciała dźwięczącego, wydającego ton tej samej wysokości; gdy więc jeden ze stroików przestroimy, to zjawisko współdrgania i współbrzmienia nie nastąpi. Jeżeli w pobliżu drgającego stroika znajduje się cały szereg stroików, wydających różne tony, to tylko ten z nich zostaje wprawiony we współdrganie i współbrzmienie, którego peryod oscylacyi ściśle się równa peryodowi drgania pierwszego stroika, inne zaś milczą. To samo dotyczy innych

ciał dźwięczących: gdy np. do wnętrza fortepianu głośno zaśpiewamy jakąś nutę, to odnośna struna, zdolna wydawać ten sam ton, zaczyna drgać i brzmieć, o czem łatwo się przekonać, umieszczając na niej koniki, które wtedy zlatują. Naodwrót—z mięszaniny różnych drgań stroik albo jakiekolwiek inne ciało dźwięczące przejmuje tylko te, które samo może wydawać. To samo stosuje się także do drgań świetlnych. Gdy wysyłane przez jakieś ciało drgania świetlne, odpowiadające pewnej określonej barwie, napotykają na swej drodze inne ciało, zdolne w pewnych warunkach wysyłać takie same drgania, wtedy zostają one pochłonięte; zjawisko to stanowi, jak później zobaczymy, podstawę analizy światła czyli t. zw. analizy spektralnej. Opisane powyżej zjawiska możemy wyrazić ogólną zasadą, orzekającą, że *każde ciało przejmuje za pośrednictwem odpowiedniego środka drgania innego ciała, jeżeli są one zgodne z temi, które samo może wykonywać i z mięszaniny różnych drgań wybiera i przejmuje tylko te, które ściśle odpowiadają własnym jego drganiom.*

Rozważmy teraz rezultaty jednoczesnego drgania dwóch niezupełnie ściśle dostrojonych do siebie kamertonów. Przypuśćmy, że przez przyklejenie kawałka wosku do jednego z nich, zmniejszyliśmy liczbę jego drgań o 1 względem drugiego; niechaj np. ten ostatni wykonywa 240 drgań na sekundę, pierwszy zaś—239. Co z tego wyniknie? Jeżeli oba stroiki rozpoczynają swe oscylacye od tej samej fazy, t. j. tak, że zgęszczenia fal, wytwarzanych przez jeden z nich zlewają się ze zgęszczeniami fal drugiego i rozrzedzenia fal jednego koincydują z rozrzedzeniami fal drugiego, to jasną jest rzeczą, iż stan taki—t. j. zgodność faz utrzymać się nie może. Jeden bowiem stroik coraz bardziej się spóźnia względem drugiego i po upływie $^1/_2$ sekundy od początku ruchu spóźnienie to wynosi $^1/_2$ oscylacyi tak, że stroiki znajdują się wtedy w fazach wręcz przeciwnych. W tym momencie jeden z nich wywołuje zgęszczenie tam, gdzie drugi wytwarza rozrzedzenie i wskutek tej interferencyi oba stroiki w tym określonym momencie wzajemnie się zobojętniają tak, że nie słyszymy wtedy żadnego, albo też tylko bardzo słaby ton. Od tego momentu stroiki znowu coraz więcej się wspomagają, aż po upływie 1 se-

kundy, gdy jeden skończy 240, drugi zaś—239 drganie, otrzymamy znowu stan początkowy, t. j. koincydencyę. To samo zachodzić będzie podczas każdej następnej sekundy ([1]). Oczywiście, że w takich warunkach nie może mieć miejsca ciągłe i doskonałe współbrzmienie stroików; przeciwnie mamy tu naprzemian to wzmocnienie, to osłabienie tonu, pierwsze dosięga maximum przy zgodności faz, drugie zaś przy przeciwieństwie faz. W ten sposób wywołujemy zjawisko, znane muzykom pod nazwą *kołysań*, przyrosty natężenia tonu nazywają *uderzeniami*, ubytki zaś—*pauzami*, często bowiem podczas tych ostatnich wcale nie słyszymy tonu.

Przyklejmy teraz za pomocą wosku do jednego z naszych stroików drobny pieniądz, np. srebrną dziesięciogroszówkę; niechaj wskutek tego obciążenia wykonywa on o 6 drgań na sekundę mniej, niż drugi, nieobciążony stroik. Ile uderzeń usłyszymy w ciągu sekundy? Po pewnym namyśle przekonywamy się, że 1 uderzenie musi nastąpić w odstępie czasu, którego potrzebuje jeden stroik na to, ażeby wykonać o 1 drganie więcej, niż drugi; a ponieważ w rozważanym teraz wypadku mamy 6 takich odstępów czasu w ciągu każdej sekundy, otrzymamy więc także 6 uderzeń w ciągu tego czasu. Jednem słowem *liczba uderzeń w ciągu sekundy zawsze równa się różnicy częstości drgań.* Uderzenia podobne możemy także otrzymać za pomocą jakichkolwiek ciał dźwięczących. Jeżeli naprzykład mamy przed sobą dwie dokładnie do siebie dostrojone piszczałki kryte lub otwarte, to zadąwszy jednocześnie w obie, otrzymamy doskonałe współbrzmienie. Wystarcza jednak zbliżyć palce do wargi jednej piszczałki, ażeby zmniejszyć częstość jej drgań i w ten sposób wywołać szybko po sobie następujące i nader silne uderzenia; trzymając rękę ponad wylotem jednej z otwartych piszczałek, nastrojonych do *unissono*, wywołujemy również uderzenia, które następują tem częściej, im więcej zakrywamy otwór.

Uderzenia piszczałek możemy także przedstawić optycznie za pomocą przyrządu, przedstawionego na fig. 227, str. 341. Je-

---

([1]) Porównaj metodę koincydencyj, opisaną na str. 47.

żeli piszczałki są nastrojone do *unissono*, to, przy zadęciu w obie i przy obracaniu zwierciadła, otrzymamy symetryczne obrazy świetlne, jednak tak, że zęby jednej smugi świetlnej przypadają pomiędzy zęby drugiej smugi, co pochodzi od tego, że dwie blizko siebie ustawione i nastrojone do *unissono* piszczałki drgają zawsze w fazach przeciwnych. Gdy zaś wysuwamy nieco jednę z zasuwek, znajdujących się przy górnych końcach piszczałek i przez to odmykamy mały boczny otwór, wtedy skracamy długość odnośnej piszczałki i przestrajamy ją nieco względem drugiej: następują silne uderzenia i symetrya obrazów świetlnych w obracającem się zwierciedle zostaje naruszona.

Kołysania, pochodzące wskutek braku zgodności drgań dwóch stroików, dają się przedstawić optycznie za pomocą urządzenia, przedstawionego na fig. 220, str. 335. Widzieliśmy wtedy, że gdy równolegle do siebie ustawione drgające kamertony

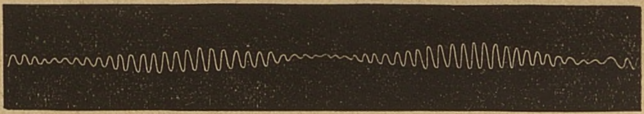


Fig. 235. Optyczne przedstawienie kołysań dźwięku.

są ściśle nastrojone do *unissono*, wtedy odbity od ich zwierciadeł *m* i *n* promień świetlny kreśli na ekranie prostą pionową linię, stawającą się bez przerwy coraz to krótszą, w miarę zmniejszania się amplitudy drgań stroików i redukującą się tylko przy ustaniu tych drgań do małego świetlnego krążka, pozostającego w spoczynku. Gdybyśmy przytem zlekka przesuwali stroik ze zwierciadełkiem *n* z lewa na prawo, albo sam ekran z prawa na lewo, to ujrzelibyśmy na ekranie poziomą świetlną linię falową o jednostajnych wszędzie wygięciach, taką, jaką przedstawia np. fig. 219, str. 332. Przestrójmy natomiast jeden ze stroików, przyklejając doń kawałek wosku, a otrzymamy na ekranie świetlną pionową linię, która peryodycznie się wydłuża i skraca; w momentach, gdy linia ta jest najdłuższą, słyszymy uderzenia, w tych zaś, gdy jest najkrótszą—zachodzą pauzy. Przesuwajmy

stroik lub ekran, jak wyżej podano, a otrzymamy poziomą linię o niejednostajnych, peryodycznie to zwiększających się, to zmniejszających wygięciach (figura 235). Maxima tych ostatnich odpowiadają uderzeniom, minima zaś—pauzom.

W tem miejscu wypada nam rozważyć nową grupę dźwięków muzykalnych, za przyczynę których przez długi czas uważano uderzenia i które teraz tłómaczymy jako szczególny wypadek interferencyi. Przy jednoczesnem brzmieniu dwóch *silnych* i różnych tonów powstają nowe i zupełnie odmienne od nich t. z. *tony kombinacyjne*, zauważone po raz pierwszy w r. 1745 przez organistę niemieckiego Sorgego i później dokładniej nieco zbadane przez sławnego skrzypka włoskiego Tartini'ego, od imienia którego nazywają je też niekiedy tonami Tartini'ego. Dla otrzymania tonów kombinacyjnych najlepiej jest użyć syreny z krążkiem o kilku szeregach otworów. Przypuśćmy, że kolejne szeregi krążka mają 16, 12, 10, 8, 6, 4 otworów. Obracajmy szybko krążek i dmijmy jednocześnie przez 2 szeregi o 8 i o 12 otworach, a otrzymamy, jak już wiemy, primę i kwintę, oprócz nich czułe ucho słyszy jednak jeszcze jeden ton—kombinacyjny, tej samej wysokości, jaki otrzymalibyśmy dmąc przez szereg o 4 otworach, a więc o oktawę niższy od niższego z obu pierwotnych tonów. Dmijmy jednocześnie przez szeregi o 12 i 16 otworach, a usłyszymy oprócz primy i kwarty jeszcze jeden ton—kombinacyjny, taki sam, jaki otrzymalibyśmy dmąc przez szereg o 4 otworach; częstość drgań tego tonu wynosi w tym razie $^1/_3$ częstości drgań niższego z tonów pierwotnych. Dmijmy nareszcie przez szeregi o 10 i 16 otworach, a usłyszymy obok primy i małej tercyi ton kombinacyjny, odpowiadający szeregowi o 6 otworach. We wszystkich tych wypadkach *częstość drgań tonu kombinacyjnego równa się różnicy częstości drgań tonów pierwotnych*, dlatego też nazwano takie tony kombinacyjne *różnicowemi*. Obok nich występują jeszcze inne, tony jednak różnicowe pod względem natężenia przewyższają wszystkie inne tony kombinacyjne i dlatego najłatwiej mogą być słyszane.

Tomasz Young tłómaczył powstawanie tonów kombinacyjnych jako skutek działania uderzeń, które, gdy następują dosyć

szybko po sobie, zlewają się,—na wzór peryodycznych impulsów zwykłych muzykalnych tonów—w jeden ciągły ton—kombinacyjny. Za takiem tłómaczeniem zdaje się przemawiać fakt, że częstość drgań tonu kombinacyjnego, zarówno jak i liczba uderzeń, równa się różnicy częstości drgań obu tonów pierwotnych. Takie objaśnienie nie wytrzymuje jednak ściślejszej krytyki. Uderzenia słychać silniej, niż jakikolwiek ciągły ton i nietrudno je odróżniać nawet wtedy, gdy same powodujące je tony są już niesłyszalne. Pochodzi to po części wskutek pewnych właściwości naszego ucha, głównie jednak wskutek tego, że gdy dwa niejednakowo wysokie tony powodują kołysania, wtedy wypadkowa amplituda drgań cząstek otaczającego powietrza w pewnych chwilach — podczas interferencyi zostaje zredukowana do minimum, w innych zaś—podczas koincydencyi, a więc podczas uderzeń dosięga wielkości większej, niż amplituda drgań, odpowiadająca każdemu z pojedyńczych tonów, wskutek czego uderzenia łatwiej można słyszeć, niż same te tony ([1]).

Gdyby więc tony kombinacyjne pochodziły wskutek zlewania się uderzeń tonów pierwotnych, wtedy musielibyśmy pierwsze słyszeć także w razie, gdy te ostatnie tony są bardzo słabe. Tak jednak nie jest. Okoliczność ta zniewoliła Helmholtza do ponownego zbadania omawianego tu przedmiotu. Uczony ten wykazał, że przyczyna tonów kombinacyjnych jest zupełnie różna od tej, jaką podał Young. Nadmieniliśmy już (patrz str. 345) o prawie nakładania się drgań, orzekającem, że gdy dwa albo więcej ruchów drgających, odpowiadających pojedyńczym tonom, jednocześnie rozchodzą się w powietrzu, wtedy nakładają się one i tworzą ruchy złożone tak, że każdy ruch złożony daje się rozłożyć tylko na te elementarne ruchy, z których powstał. Otóż podobnie jak prawo izochronizmu wahań wahadła (patrz str. 36) stosuje się tylko do małych łuków, tak też i prawo superpozycyi czyli nakładania się drgań jest ściśle słusznem tylko dla drgań o nadzwyczaj małej amplitudzie. Przy większych zaś amplitudach oscylacyi powstają, wskutek ścierania się cząstek drgają-

---

([1]) Wiemy bowiem, że natężenie dźwięku zależy od amplitudy drgań powietrza.

cych, jeszcze drugorzędne ruchy drgające, tworzą się fale wtórne, które dochodzą naszego ucha jako tony kombinacyjne. Wykazawszy to, Helmholtz dalej wywnioskował, że podobnie jak istnieją tony kombinacyjne różnicowe, tak też na zasadzie teoryi, muszą się także dać otrzymać tony kombinacyjne o częstości drgań, równej sumie częstości drgań powodujących je tonów pierwotnych, a więc tony *sumowe* i następnie doświadczalnie wykazał ich istnienie. Tony kombinacyjne sumowe, nie dające się, jak widzimy, wytłómaczyć na zasadzie teoryi Younga, znajdują zupełne wyjaśnienie w teoryi Helmholtza.

Inny skutek niestosowalności prawa nakładania się drgań do oscylacyj o zbyt wielkich amplitudach stanowi fakt, że gdy pojedyńcze ciało dźwięczące drga bardzo silnie, to wytwarza ono w powietrzu fale wtórne, które odpowiadają harmonicznym tonom ciała dźwięczącego. Tak np. pierwszemu górnemu tonowi stroika odpowiada częstość drgań mniej więcej $6\frac{1}{4}$ razy większa, niż jego tonowi zasadniczemu (patrz str. 296); górny ten ton nie jest więc harmoniczny z tonem zasadniczym. Helmholtz jednak wykazał, że jeżeli wprawia się stroik w drgania nie przez pociąganie go smyczkiem, lecz przez silne uderzenie o kloc, to wydaje on oktawę tonu zasadniczego (t. j. pierwszy ton harmoniczny), którą należy przypisywać falom wtórnym, powstającym wskutek innego nakładania się drgań, niż to, jakiego wymaga wyłuszczone wyżej prawo, stosujące się tylko do drgań o nadzwyczaj małej amplitudzie.

„Rozważania te, powiada Tyndall, jasno pokazują, że połączenie muzykalnych tonów przedstawia proces daleko bardziej zawiły, niżby to można było sądzić. Gdy np. gra orkiestra, to oprócz zasadniczych tonów każdej struny i każdego instrumentu dętego, powstają jeszcze ich górne tony, dochodzące niekiedy aż do 16-go tonu odnośnego szeregu, dalej tony kombinacyjne—zarówno różnicowe, jak i sumowe; wszystkie one wstrząsają to samo powietrze i wytwarzają fale, które uderzają o ten sam bębenek uszny. Przytem tony każdej grupy—zasadniczych, górnych i kombinacyjnych interferują z sobą i z tonami innych grup. Wyobraźnia cofa się bezsilnie przed próbą unaocznienia za-

wiłego stanu powietrza podczas rozchodzenia się w niem wszystkich tych tonów. A jednak dążności muzyki wszech czasów, podczas których służyła ona ku rozkoszy ludzkości, zmierzały do takiego empirycznego urządzenia rzeczy, ażeby ucho nie cierpiało od rozdźwięków, mogących powstać wskutek tych różnorodnych interferencyj. Zajęci tem muzycy nie wiedzieli przytem nic o fizykalnych faktach i zasadach, leżących w osnowie ich usiłowań, wiedzieli oni o tem wszystkiem również mało, jak wynalazca prochu o stosunkach, w jakich łączą się różne ciała. Próbowali oni bezustannie, aż osiągnęli zadawalniające rezultaty i dopiero teraz, gdy duch nauki ożywił tę sprawę, zaczyna się z chaosu wyłaniać harmonia i okazuje się, że rezultaty tych prób empirycznych zgadzają się z prawami przyrody.“

§ 3. Uginanie się fal dźwiękowych.

Ruch falowy cechuje się jeszcze jednem zjawiskiem, zwanem dyffrakcyą albo uginaniem się fal. Gdy duża fala morska napotyka na swej drodze samotnie stojącą skałę, wtedy wznosi się ona do góry i opływa skałę dokoła. Fakty podobnego rodzaju zniewoliły Newtona do zarzucenia teoryi falowania światła. Gdyby światło—argumentował on—istotnie polegało na ruchu falowym, wtedy stawiając na jego drodze jakieś ciało nieprzezroczyste, nie otrzymalibyśmy cienia, gdyż fale światła zachodziłyby za krawędzie ciała nieprzezroczystego, uginałyby się tak samo, jak fala wodna opływa napotkaną skałę. Od owego czasu udało się atoli wykazać zjawisko uginania się dla światła, o czem obszerniej pomówimy w następnej księdze, i w ten sposób usunięto jeden z najpoważniejszych zarzutów przeciw teoryi falowania światła. Podobnie także i fale dźwiękowe obchodzą przeszkodę, t. j. promienie dźwięku przy krawędziach napotkanego ciała zginają się. Stojąc za przeszkodą można słyszeć, lecz na pewnej tylko niewielkiej odległości, wskutek bowiem uginania się dźwięku, natężenie jego znacznie się zmniejsza, tworzy się jakby częściowy „cień dźwięku“ tak, że na większej odległości wcale go już nie słyszymy. Kto obserwował przejście pociągu

przez tunel, ten zauważył zapewne zachodzące przy tem zmiany w natężeniu dźwięku. Szum wodospadu zostaje znacznie przyciszony, jeżeli pomiędzy nim a nami znajduje się chociażby niewielki pagórek, słabsze zaś dźwięki zostają przez podobną przeszkodę zupełnie stłumione. A jednak, jak powiedzieliśmy, „cień dźwięku“ jest tylko częściowy i człowiek stojący naprzykład za tarczą, słyszy wystrzał, chociaż kula nie może weń ugodzić. Wspominany przez nas tyle razy w tej księdze autor opowiada następujący, nader ciekawy przykład uginania się dźwięku, jaki zaszedł w wiosce Erith podczas wybuchu magazynu prochu w r. 1864. Wioska ta leży o kilka mil drogi od rzeczonego magazynu, pomimo to jednak szyby w oknach wszystkich jej domów wskutek wstrząśnień powietrza, spowodowanych przez wybuch prochu, popękały i, co szczególniej zaznaczyć należy, okna, odwrócone od miejsca wybuchu, ucierpiały tyleż co i te, które były doń zwrócone. Okna kościoła wiejskiego oprawione były w ołowiane ramy, które będąc względnie giętkie, poddały się naciskowi zgęszczonego powietrza tak, że niewiele tylko szyb popękało. Wszystkie jednak okna kościoła, zarówno po tej jego stronie, która była zwrócona do miejsca wybuchu, jak i tej, która była odeń odwrócona, zostały wgięte do wnętrza gmachu. Gdy fala dźwiękowa dosięgła kościoła, to obeszła go z prawej i z lewej strony, otaczając go przez chwilę pierścieniem silnie zgęszczonego powietrza, które wszystkie okna wcisnęło na wewnątrz. Po tem zgęszczeniu nastąpiło niewątpliwie rozszerzenie powietrza w kościele, usiłujące okna znowu wyprostować. Znaczna jednak część siły zgęszczenia powietrza, otaczającego kościół, użytą została na zgięcie okien, wskutek czego powietrze wewnątrz kościoła uległo tylko niewielkiemu zgęszczeniu tak, że następujące potem rozszerzenie tegoż powietrza nie wystarczyło już do zniesienia działania pierwotnego nacisku i do wyprostowania okien.

ROZDZIAŁ V.

Analiza i synteza dźwięku.

§ 1. Rezonatory. Analiza dźwięku za pomocą metody optycznej i graficznej. Fonautograf i fonograf.

Na zasadzie praw odbrzmiewania, omówionych na str. 309, możemy zanalizować każdy złożony dźwięk, t. j. rozłożyć go na składowe tony. Do tego celu służą przyrządy, zwane rezonatorami. Zwykłą ich formę stanowi wydrążona kula (fig. 236), szklana lub mosiężna, z dużym otworem po jednej i małym — po drugiej stronie. Gdy powietrze, zawarte wewnątrz kuli, zostaje w jakikolwiek sposób wprawione w drgania, wtedy wydaje ona ton pewnej określonej wysokości, gdy np. średnica szklanej kuli wynosi 13 cent., wewnętrzna zaś jej objętość—1053 centym. sześc., to rezonator jest, że tak powiemy, nastrojony na ton *c'* i może ten ton wydawać samodzielnie (¹), albo nań odbrzmiewać. Niekiedy rezonatorowi nadaje się postać wydrążonego walca, składającego się z dwóch wchodzących jedna w drugą i wysuwalnych rur (fig. 237) tak, że długość rezonatora, a więc i objętość zawartego w nim powietrza można dowolnie zmieniać,

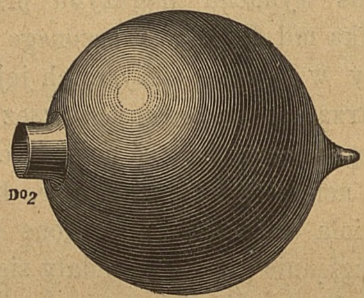


Fig. 236. Rezonator kulisty.

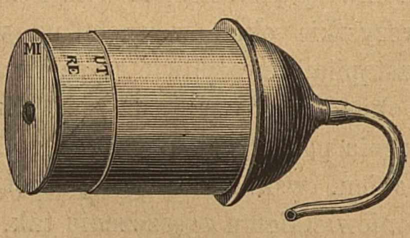


Fig. 237. Rezonator walcowaty.

(¹) Gdy rezonator uderzamy.

przez co może on służyć do wzmocnienia różnych tonów. Walec ten po jednej stronie posiada duży otwór, przez który wchodzi dźwięk, po drugiej zaś—komunikuje przez mniejszy otwór z rurką kauczukową, którą przy analizowaniu dźwięku wprowadza się do ucha albo do pudełka z płomieniem manometrycznym. Jeżeli w powietrzu zachodzą drgania, przedstawiające ten sam peryod, co i powietrze zawarte w rezonatorze, wtedy ostatni przejmuje te drgania i sam zaczyna silnie brzmieć. Gdy więc zaopatrzymy się w cały szereg rezonatorów, z których jeden nastrojony jest np. na ton *c*, inne zaś na kolejne tony harmoniczne, a więc na c', g', c'' i t. d., to wówczas w pobliżu jakiegoś ciała dźwięczącego, dajmy na to piszczałki, wydającej ton *c* jako zasadniczy, jedne rezonatory się odezwą, inne zaś nie. O brzmieniu danego rezonatora możemy się przekonać, jeżeli, zatkawszy jedno ucho, przyłożymy do drugiego mniejszy otwór rezonatora, większy zaś jego otwór, znajdujący się po stronie przeciwnej, zwrócimy ku piszczałce. Jeśli ton, odpowiadający temu rezonatorowi, wchodzi w skład złożonego dźwięku piszczałki, to wyraźnie słyszymy, iż rezonator właściwym sobie tonem głośno śpiewa, wzmacniając ten właśnie ton piszczałki; w przeciwnym razie słyszymy przez rezonator poprostu tylko dźwięk piszczałki bez żadnego wzmocnienia któregokolwiek ze składowych jego tonów. Co więcej, wsłuchawszy się dobrze w ton, śpiewany w ten sposób przez rezonator i zachowawszy w umyśle wysokość tego tonu, możemy zupełnie oddalić rezonator i bez jego pomocy bezpośrednio rozróżnić ten ton w ogólnem brzmieniu piszczałki. Powtarzając kilkakrotnie to ćwiczenie z rezonatorami, odpowiadającemi harmonicznym tonom danego ciała dźwięczącego, możemy już następnie nieuzbrojonem uchem słyszeć bardzo wiele, a nawet wszystkie przytony, towarzyszące jego tonowi zasadniczemu. W zwykłych warunkach słyszymy przeważnie ten ostatni ton dlatego, że brzmiąc najsilniej, przyćmiewa on inne.

Dla uniknienia żmudnego i długotrwałego przykładania różnych rezonatorów do ucha, Koenig przenosi drgania zawartego w nich powietrza na odpowiednie płomienie manometryczne, które opisaliśmy już szczegółowo na str. 239. Odnośny przy-

rząd (fig. 238) składa się z całego szeregu umieszczonych jeden ponad drugim rezonatorów, nastrojonych na kolejne tony harmoniczne, np. na c'', c''', g''', c'''', e'''' i t. d. Z boku znajduje się podłużne pudło, opatrzone palnikami, które zasila się gazem oświetlającym, doprowadzanym za pomocą rury kauczukowej (na rysunku niewidocznej) ze zbiornika. Każdy palnik posiada swoje

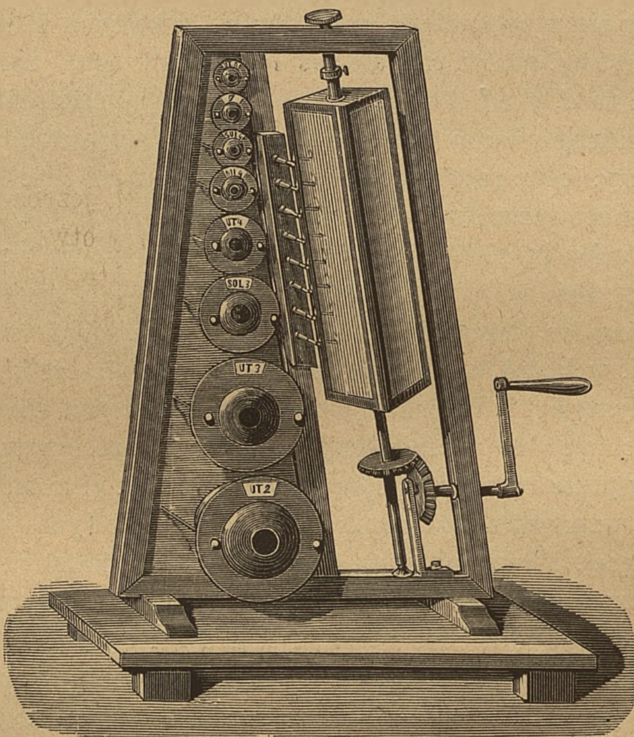


Fig. 238. Przyrząd Koeniga do analizy dźwięku.

pudełko manometryczne (patrz str. 239), komunikujące za pomocą rurki (na rysunku również niewidocznej) z mniejszym otworem odnośnego rezonatora. Płomienie palników stanowią szereg pionowy, odpowiadający szeregowi rezonatorów i odzwierciadlają się w umieszczonem tuż obok nich lustrze. Jeżeli wszy-

stkie rezonatory milczą, to przy szybkiem obracaniu zwierciadła ujrzymy w niem obrazy oddzielnych płomieni w postaci niezazębionych smug świetlnych. Gdy natomiast w pobliżu przyrządu jakikolwiek instrument muzyczny wydaje dźwięk, wtedy powietrze zostaje wprawione w drgania w tych rezonatorach, których tony są zawarte w owym dźwięku i odnośne smugi zazębiają się mniej lub więcej silnie, zależnie od natężenia danego tonu, inne zaś smugi pozostają bez zmiany. W ten sposób dowiadujemy się, jakie tony wchodzą w skład analizowanego dźwięku i poznajemy jego koloryt muzyczny. Gdy np. w pobliżu opisanego przyrządu piszczałka kryta wydaje dźwięk o tonie zasadniczym *c''*, wówczas tonowi temu, jak już wiemy (patrz str. 316), towarzyszą przytony o 3, 5, 7 i t. d. razy większej częstości drgań, a więc tony *g'''*, *e''''*, *b''''* i t. d., wskutek czego w obracającem się zwierciedle pierwsza—licząc od dołu—trzecia, piąta i siódma smugi będą zazębione, inne zaś—nie.

Możemy także jednocześnie badać różne cechy danego dźwięku: jego wysokość, natężenie i koloryt, albo ściślej mówiąc, wysokości jakoteż natężenia jego tonów składowych, jeżeli pozwolimy dźwiękowi temu działać na jeden i ten sam płomień manometryczny. Wytwórzmy np. w pobliżu otworu stożka przyrządu manometrycznego, przedstawionego na fig. 225, str. 339, jakikolwiek dźwięk, wtedy fala dźwiękowa uderza o błonę przedzielającą pudełko i wprawia ją w złożone drgania, odpowiadające poniekąd złożonym drganiom samego ciała dźwięczącego, i płomień okaże nam te ruchy błony, zmieniając odpowiednio swą wysokośc. Obraz tak drgającego plomienia ujrzymy w obracającem się zwierciedle w postaci jednej zazębionej u góry smugi świetlnej, której duże zęby powycinane są w drobniejsze zęby. Liczba i długość największych zębów wskazują częstość i amplitudę drgań zasadniczego składowego tonu badanego dźwięku, liczba zaś i wielkość drobniejszych zębów wskazują częstość i amplitudę drgań górnych tonów, towarzyszących tonowi zasadniczemu, jak to pokazują np. figury, przedstawione na str. 342, które otrzymamy, wytwarzając w pobliżu rzeczonego stożka dźwięk, złożony z primy i oktawy, względnie z primy i tercyi.

Skomplikowane drgania błony, pobudzanej jednocześnie przez kilka systemów fal dźwiękowych, odpowiadających pojedyńczym składowym tonom analizowanego dźwięku, możemy także przedstawić graficznie, przyczepiając do błony ostrze, które kreśli na stósownie przyrządzonym walcu linię falową, unaoczniającą swemi wygięciami kombinacyę odnośnych składowych tonów. Przyrząd taki, samozapisujący drgania dźwiękowe i zwany od tego *fonautografem*, został wynaleziony przez Leona Scotta i udoskonalony przez Koeniga. Składa się on (fig. 239) z mniej lub więcej 50 centym. długiego wydrążonego elipsoidu z gipsu (Koenig używa teraz do tego celu paraboloidu z metalu), z jednej strony—przy *C*—otwartego, z drugiej zaś—przy *B*—zamkniętego przez stałe, w środku przedziurawione, dno. Przez środkowy ten otwór przechodzi krótka mosiężna rurka *c*, której jeden koniec, wchodzący do elipsoidu, jest otwarty, drugi zaś—wystający z niego, jest zakryty przez elastyczną kauczukową błonę. Do błony tej, mogącej być silniej lub słabiej napiętą, przyczepione jest lekkie sztywne ostrze *b*. Ruchomą sztabkę *a*, naciskającą jednym swym końcem rzeczoną błonę, należy tak ustawić, ażeby ostrze *b* pod-

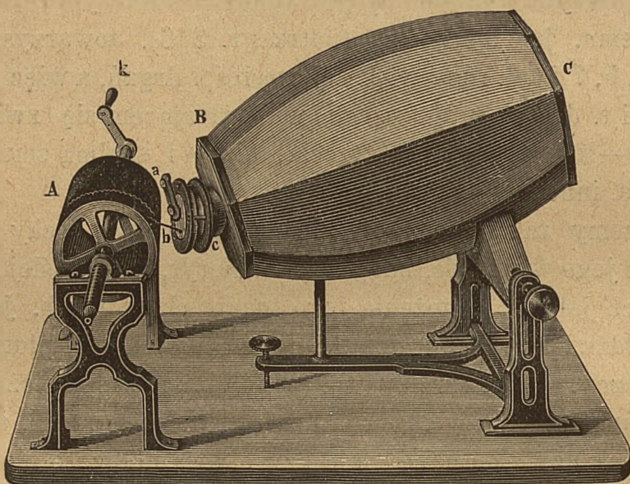


Fig. 239. Fonautograf Scotta i Koeniga.

czas drgań błony przytykało do któregoś z jej brzuszków, nie zaś do węzła.

Opisany przyrząd przysuwa się (jak to pokazuje fig. 239) do walca *A*, pokrytego zakopconym papierem i osadzonego na poziomej szrubowej osi, naokoło której może być obracany za pomocą korby *k;* wskutek takiego urządzenia, walec przy każdym obrocie przesuwa się nieco w kierunku poziomym. Ostrże *b* nie powinno przytem stać prostopadle ani do błony, ani do walca, lecz skośnie do obojga. Jeżeli do elipsoidu przy *C* wpływają fale dźwiękowe pojedyńczego tonu, to błona wraz z ostrzem drga w *unissono* z drganiami powietrza, odpowiadającemi temu tonowi i ostrze kreśli wtedy na obracającym się walcu linię falową o wszędzie jednostajnych wygięciach, jak ją przedstawia np. fig. 188 na str. 282. Jeżeli zaś przy *C* wpadają jednocześnie systemy fal dwóch albo więcej różnych tonów, czyli złożony dźwięk, wtedy drgania błony odpowiadają skombinowanym drganiom powietrza, wstrząsanego przez wszystkie wpadające do elipsoidu systemy fal i ostrze kreśli na obracającym się walcu linię, której częstość i wielkość wygięć zależą od częstości i amplitudy drgań, odpowiadających składowym tonom badanego dźwięku.

Poznawszy przebieg wygięć linij falowych, odpowiadających różnym kombinacyom tonów, możemy już z postaci linii, nakreślonej za pomocą fonautografu przy brzmieniu danego dźwięku, wnioskować o częstości i amplitudzie drgań składowych jego tonów.

Sławny wynalazca Edison spożytkował zasadę fonautografu przy zbudowaniu przyrządu, odtwarzającego różne dźwięki, a nawet całe melodye lub mowy i zwanego *fonografem.* Podajemy tu opis tego przyrządu według fizyki Daniella: Fonograf Edisona jest fonautografem o niezbyt cienkiem ostrzu, znaczącem drgania błony, do której jest przytwierdzone, na arkuszu miękkiej cynfolii, nawiniętej na obracający się walec; błona, drgając, wgniata ostrze w cynfolię głębiej lub płyciej, ostrze więc rzeźbi na cynfolii rowek o zmiennej głębokości. Jeżeli błonę po wyrzeźbieniu rowka oddalimy od walca,— który następnie odwrócimy w drugą

stronę—do pierwotnego położenia, poczem znowu przyciśniemy błonę do cynfolii tak samo jak z początku, a nawet trochę mocniej, to, przy obracaniu walca z poprzednią prędkością, zagłębienia w cynfolii, przesuwając się w tym samym co i poprzednio porządku pod ostrzem, wprawiają to ostatnie, a wraz z niem i błonę w ruch to ku walcowi, to od niego. Powstające w ten sposób drgania błony udzielają się powietrzu, zawartemu w fonautografie, a dalej otaczającemu ten ostatni powietrzu i wywołują w niem fale, które, dochodząc do ucha, wytwarzają dźwięki, podobne do pierwotnych.

Z początku Edison nie potrafił zupełnie wiernie odtwarzać niektórych spółgłosek, zwłaszcza wargowych i syczących (*b*, *p*, *t*, *d*, *k*, *g*, *s*, *z*) oraz wysokich tonów składowych pierwotnych dźwięków, w ostatnich jednak czasach zdołał on braki te szczęśliwie usunąć, i niedawno temu wykonywane w różnych miejscach próby z najnowszym jego fonografem wypadły bardzo pomyślnie.

§ 2. Koloryt muzyczny (brzmienie).

Za pomocą metod, opisanych w poprzednim §, można się przekonać, że dźwięki, wydawane przez różne instrumenty muzyczne, nie są proste, lecz złożone z kilku lub więcej tonów. Pochodzi to, jak już pokrótce nadmieniliśmy na str. 293, ztąd, że każde ciało dźwięczące, drgając jako całość, dzieli się przytem także mniej lub więcej wyraźnie na części, wskutek czego obok tonu zasadniczego powstają także tony górne. Te ostatnie, łącząc się w rozmaitych kombinacyach z jednym i tym samym tonem zasadniczym, wytwarzają właściwość, zwaną brzmieniem albo kolorytem muzycznym (*timbre*), odróżniającą od siebie tony tej samej wysokości, wytwarzane przez rozmaite instrumenty. Bliższe badania Helmholtza, zamieszczone w wiekopomnem jego dziele „Nauka o wrażeniach dźwiękowych,“ ustaliły w sposób niewątpliwy fakt, że *koloryt muzyczny zależy tylko od liczby, wysokości i natężenia tonów górnych, domięszanych do tonu zasadniczego*. Pomijamy tu szmery, częstokroć towarzyszące samym tonom, jak np. syczenie instrumentów dę-

tych, drapanie instrumentów strunowych oraz liczne inne właściwości dźwięków, używane bezwiednie przez pospolite ucho do rozpoznania brzmienia. Twierdzenie Helmholtza stosuje się tylko do brzmienia dźwięku czystego, doskonałego, oswobodzonego od wszelkich szmerów.

Naturalne dźwięki nie są więc pojedyńcze; możemy atoli brzmienia bez tonów górnych wytwarzać sztucznie. W tym celu umieszcza się np. drgający stroik w pobliżu rury rezonansowej, nastrojonej na jego ton zasadniczy. Rura taka, odbrzmiewając tylko na ten ostatni albo na jeden z przytonów parzystych lub nieparzystych, zależnie od tego, czy jest otwarta, czy kryta (patrz str. 316), nie będzie wcale odpowiadać na górne tony stroika, nieharmoniczne z jego tonem zasadniczym tak, że otrzymamy tylko ten ostatni bez domieszki tonów wyższych. „Pojedyńcze takie tony, powiada Helmholtz, są niezwykle miękkie, wolne od wszelkiej ostrości i ochrypłości; wydają się one przytem bardzo nizkiemi tak, że te, które co do wysokości swej odpowiadają dolnym tonom basu, sprawiają wrażenie dźwięków szczególnie, niezwykle nizkich. Z pojedyńczych tonów, których wysokość leży pomiędzy granicami sopranu, niższe brzmią jasno i dźwięcznie, ale nawet najwyższe z nich nie posiadają ani śladu owej nieprzyjemnej ostrości i piskliwości tonów, wydawanych przez większość instrumentów muzycznych, za wyjątkiem chyba fletu, którego brzmienia najwięcej jeszcze zbliżają się do tonów pojedyńczych dlatego, że górne tony fletu są nieliczne i słabe. Pojedyńcze tony mogą naturalnie wykazywać różnice tylko w natężeniu, nie zaś w kolorycie muzycznym. W samej rzeczy brzmienie jest zupełnie jednakowe, czy ton zasadniczy stroika przeniesiemy na otaczające powietrze za pomocą rury rezonansowej z dowolnego materyału—szkła, metalu lub tektury, czy też za pośrednictwem przyczepionej do stroika struny.“

Tony pojedyńcze brzmią jednak, że się tak wyrazimy, czczo i dlatego znajdują tylko bardzo ograniczone zastosowanie w muzyce. Również mało używają się dźwięki o bardzo wysokich lub nieharmonicznych tonach wyższych lub hałasach, jak je wydają naprzykład drgające płyty lub krążki. Sprawiają one na

ucho wrażenie nader niemiłe. co głównie ztąd pochodzi, że górne tony takich płyt lub krążków nie są ciągłe, lecz przerywane i przez to powodują ostrość brzmienia, silnie obrażającą ucho. Można dźwięków takich używać w muzyce tylko wtedy, gdy górne te tony albo hałasy są bardzo słabe i ciągłe, jak to np. ma miejsce z hałasem, powodowywanym przez wypływające z otworów powietrze, podczas gry na flecie lub trąbie. Największe zastosowanie znajdują w muzyce dźwięki o niezbyt wysokich i słabo brzmiących przytonach. Liczba tych ostatnich, jakoteż natężenie każdego z nich względem tonu zasadniczego, określają koloryt muzyczny danego dźwięku. Największe bogactwo odcieni pod tym względem przedstawia głos ludzki.

Podczas gdy ton pojedyńczy, dający się otrzymać w powyżej podany sposób, brzmi bardzo miękko, lecz czczo, to będąc zmięszany z pierwszemi 5—6 przytonami o słabem natężeniu, staje się on pełnym, głośnym, harmonijnym, jak tony piszczałek organowych, fletu, fortepianu lub średnio silnego głosu męzkiego. Jeżeli zaś dołączymy doń jeszcze dalsze tony górne, zwłaszcza te, którym odpowiada 7, 11, 13 razy większa częstość drgań, niż tonowi zasadniczemu, wtedy ucho doznaje bardzo różnych, po większej części nieprzyjemnych wrażeń i dźwięk brzmi ostro i ochrypło. W ogóle możemy przyjąć za prawidło, że dźwięki bez tonów wyższych są miękkie i głuche, z 5 lub 6 pierwszemi niezbyt głośnemi przytonami—pełne i harmonijne, nareszcie brzmienia z wielu, szczególnie dalszemi (poczynając od 7-go) przytonami są ochrypłe i ostre.

§ 3. Synteza dźwięków.

Gdy rozkładamy jakieś skomplikowane zjawisko przyrody na składowe jego objawy, gdy je tylko analizujemy, wówczas nigdy nie możemy być pewni, żeśmy żadnego z tych objawów nie pominęli. Należy więc zawsze, o ile tylko można, starać się sprawdzić rezultat analizy za pomocą procesu odwrotnego, t. j. przez odtwarzanie owego zjawiska ze składowych objawów, przez jego syntezę. Stosuje się to naturalnie także do zajmują-

cego nas tu przedmiotu. Jeżeli koloryt muzyczny, jak to opiewa wyłuszczone w poprzednim § twierdzenie, rzeczywiście zależy jedynie od liczby, wysokości i natężenia pewnych określonych górnych tonów, przymięszanych do danego tonu zasadniczego, to, łącząc ten ostatni z rzeczonemi tonami, powinniśmy znowu otrzymać dźwięk, niczem się nie różniący od pierwotnie analizowanego.

Otóż Helmholtz istotnie to wykonał, posługując się do tego celu następującym, nader pięknym, lecz nieco zawiłym na pierwszy rzut oka przyrządem, którego opis podajemy tu według Ganota. Przyrząd ten (fig. 240) składa się z 11 stroików, oznaczonych na figurze kolejnemi liczbami, z których jeden *A* daje ton zasadniczy o 179 drganiach na sekundę, dziewięć innych— kolejne tony harmoniczne, a więc tony o 358, 537, 716 i t. d. drganiach, jedenasty zaś *K*, nastrojony w *unissono* z kamertonem *A*, służy—w sposób, który zaraz poznamy—do wprawiania w oscylacye wszystkich pozostałych 10 stroików. Każdy z tych ostatnich posiada swój odpowiednio nastrojony rezonator i ustawiony jest pionowo pomiędzy biegunami „elektromagnesu“. (Tak nazywamy kawał miękkiego żelaza, mający zwykle postać podkowy, którego oba ramiona otoczone są zwojami drutu, t. zw. cewkami, połączonemi z bateryą elektryczną, tak jednak, że bieguny elektromagnesu wystają nieco z odnośnych cewek. Gdy przez te cewki przechodzi prąd elektryczny, wtedy żelazo magnesuje się (ztąd nazwa elektromagnesu) i przyciąga inne żelazo lub stal, a więc także ramiona znajdującego się pomiędzy jego biegunami stroika, przy przerwaniu zaś prądu—traci własności magnesu).

Stroiki wraz z ich elektromagnesami i rezonatorami ustawione są w dwa szeregi, z których jeden—na rysunku przedni—zawiera kamertony (oznaczone przez 1, 3, 5, 7 i 9), dające ton zasadniczy i kolejne nieparzyste przytony, drugi zaś — kamertony (oznaczone przez 2, 4, 6, 8 i 10), wytwarzające kolejne parzyste tony harmoniczne. Za temi stroikami ustawiony jest poziomo kamerton *K*, odgrywający rolę przerywacza prądu elektrycznego. W tym celu do górnego ra-

mienia stroika *K* przytwierdzony jest jednym końcem sztyfcik platynowy, którego drugi koniec znajduje się tuż ponad powierzchnią rtęci, nie dotykając jej; metalowe dno naczyńka, zawierającego rtęć, komunikuje za pomocą drutu *d* z elektromagnesem *L*, od którego z drugiej strony idzie drut *r* do bateryi elektrycznej.

Prąd elektryczny, wchodzący do przyrządu przy *C*, przepływa przez cewki elektromagnesu *E*, następnie przez cewki pozostałych 9 elektromagnesów i w końcu przez drut *m* wchodzi do stroika *K*. Tam prąd zostaje przerwany w wypadku, gdy

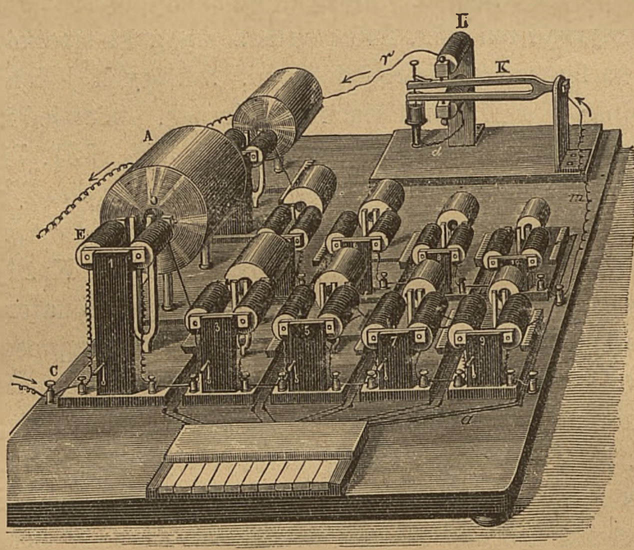
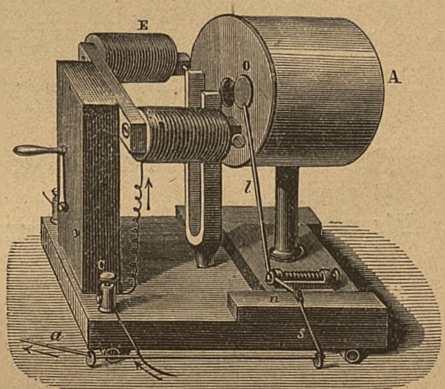


Fig. 240. Przyrząd Helmholtza do syntezy dźwięków.

stroik znajduje się w spoczynku, wtedy bowiem przyczepiony do jego ramienia sztyfcik platynowy nie pogrąża się w rtęć. Jeżeli natomiast stroik wprawimy w drgania, to przy zbliżaniu się do siebie jego ramion, rzeczony sztyfcik zanurza się w rtęci i prąd może swobodnie przejść przez stroik, sztyfcik, rtęć, drut *d* do cewek elektromagnesu, a ztamtąd przez drut *r* napowrót do bateryi (na rysunku niewidocznej); gdy następnie ramiona stroika oddalają się od siebie, sztyfcik wynurza się z rtęci i prąd znowu zostaje przerwany. To samo powtarza się przy każdej całkowitej oscylacyi stroika *K*, a ponieważ wykonywa on, jak to

już wyżej powiedzieliśmy, 129 drgań na sekundę, przeto wszystkie (11) elektromagnesy zostają 129 razy na sekundę wzbudzone i tyleż razy na sekundę przyciągają znajdujące się pomiędzy ich biegunami ramiona odnośnych stroików. Stroik *A*, wykonywający także 129 drgań na sekundę, zostaje przyciągany przez bieguny odnośnego elektromagnesu *E* przy każdej swej oscylacyi; stroik 3, którego częstość drgań jest 3 razy większa, niż stroika-przerywacza, doznaje impulsów od odnośnego elektromagnesu tylko przy każdej trzeciej oscylacyi, stroik 5—przy każdej piątej i t. d. Wskutek takiego urządzenia stroik 1 drga silniej, niż 2, ten silniej niż 3 i t. d. i ton zasadniczy brzmi najgłośniej, kolejne zaś tony harmoniczne—coraz słabiej, odpowiednio do coraz to słabszego natężenia kolejnych składowych tonów, wykazywanego zwykle przez naturalny złożony dźwięk.



Fig, 241. Pojedyńczy stroik wraz z elektromagnesem i rezonatorem w przyrządzie Helmholtza do syntezy dźwięków.

Zobaczmy teraz, jak ten przyrząd funkcyonuje. Pociągnąwszy smyczkiem stroik—przerywacz *K*, wprawiamy go w drgania, wskutek czego prąd elektryczny, przerywany 129 razy na sekundę, przepływa przez cewki elektromagnesów i wszystkie stroiki także zaczynają drgać. Otwór rezonatora każdego stroika (fig. 241) w zwykłych warunkach jest zamknięty przez krążek 0, przez co tonu drgającego stroika prawie wcale nie słyszymy. Ale każdy taki krążek przyczepiony jest do końca złożonej dźwigni, w danym wypadku *l*, *n*, *s*, której drugi koniec za pomocą sznurka *a* komunikuje z jednym z klawiszów, znajdujących się na

przodzie opisanego wyżej przyrządu (patrz fig. 240) tak, że naciskając odnośny klawisz, otwieramy dany rezonator (ten ostatni wypadek przedstawiony jest właśnie na fig. 241) i wzmacniamy ton odpowiedniego stroika. Możemy tedy, naciskając stosowne klawisze, łączyć z tonem zasadniczym te lub owe tony harmoniczne i w ten sposób odtwarzać dźwięki, których skład odkryła nam analiza. Naciskając jednocześnie np. 1, 3, 5, 7 i 9 klawisz, otrzymujemy dźwięk piszczałki krytej, dającej ton zasadniczy o 129 drganiach. Za pomocą tego przyrządu Helmholtz zdołał sztucznie odtworzyć dźwięki różnych instrumentów muzycznych i głosu ludzkiego.

ROZDZIAŁ VI.

Muzyka i ucho.

§ 1. Fizyczne warunki harmonii muzycznej. Współdźwięk (konsonans) i rozdźwięk (dyssonans). Akkordy.

Liczne doświadczenia pokazały, że połączenie dwóch tonów wywiera na ucho tem przyjemniejsze wrażenie, im mniejsze są liczby, wyrażające stosunek częstości ich drgań. Najdoskonalszy współdźwięk otrzymujemy przy interwalu 1 : 1, t. j. przy współbrzmieniu dwóch tonów jednakowej wysokości, dalej następują interwale oktawy—2 : 1, kwinty—3 : 2, kwarty—4 : 3, wielkiej tercyi—5 : 4, wielkiej sexty—5 : 3, małej tercyi—6 : 5 i małej sexty—8 : 5. Helmholtz nazywa oktawę, kwintę i kwartę doskonałemi konsonansami, wielką tercyę i wielką sextę—średniemi, małą zaś tercyę i sextę—niedoskonałemi konsonansami. Połączenia 2 tonów o innych interwalach, np. sekundy—9 : 8 albo septimy—15 : 8 są nieprzyjemne dla ucha, dają rozdźwięk, dyssonans. Nie należy sobie jednak wyobrażać, jakoby wybór powyższych interwalów dokonany był na zasadzie znajomości tych stosunków, ujawnionych dopiero przez badania naukowe ostatnich wieków. Rzeczy te ustalone były na drodze czysto empirycznej na długi czas przedtem, zanim wiedziano coś o pro-

stocie liczb, wyrażających stosunek częstości drgań składowych tonów konsonansów. Powodowano się przytem tylko przyjemnem wrażeniem, jakie pewne połączenia tonów wywierają na ucho i tych połączeń używano i teraz używa się w muzyce.

Od czego pochodzi powyższa zależność, dlaczego mniejsze liczby wyrażają doskonalszy współdźwięk? Na pytanie to w różnych czasach dawano różne odpowiedzi. Pytagorejczycy, którzy wiedzieli już wprawdzie od swego mistrza, że struna dwa razy krótsza daje oktawę, półtora razy krótsza—kwintę i t. d., lecz nie znali stosunków częstości drgań dla różnych interwalów, odpowiadali: „Wszystko jest liczbą i harmonią.“ Wyobrażali oni sobie nadto, że stosunek liczbowy siedmiu tonów gamy diatonicznej wyraża odległości planet od ich centralnego ogniska, dlatego też mówili o harmonijnym tańcu ciał niebieskich i o „muzyce sfer,“ którą, według ich zdania, tylko jeden Pytagores ze wszystkich śmiertelnych jakoby zdolny był słyszeć. Jestto naturalnie przesąd, ale zanim ich potępimy, zadajmy sobie raczej pytanie, czy my sami jesteśmy już tak zupełnie wolni od przesądów. Poważniejszą próbę wyjaśnienia powyższej zależności poczynił sławny matematyk Euler: Zastanawia się on nad przyczyną przyjemności: Znajdujemy upodobanie w porządku i przyjemnem jest dla nas „śledzenie środków, prowadzących do celu.“ Jednakże wysiłek umysłowy przy odkrywaniu tego porządku nie powinien być tak wielki, ażeby nas męczył; gdy stosunki, które musimy rozwikłać, są zbyt skomplikowane, wówczas możemy wprawdzie porządek postrzegać, lecz nie doznajemy już przytem przyjemności. Czem prostsze przeto jest wyrażenie jakiegoś prawa—tem większa uczuwana przytem przyjemność; tłómaczy nam to przewagę pod względem harmonii prostych stosunków muzykalnych nad zawiłemi. Konsonans, według Eulera, polegałby tedy na duchowej przyjemności, jakiej doznajemy przy uświadamianiu sobie prawa, nie połączonem ze zbyt wielkim wysiłkiem umysłu.

Taki sposób tłómaczenia rzeczy nie wytrzymuje jednak krytyki. Sam Pytagores, który pierwszy wykonywał doświadczenia nad interwalami muzycznemi, nic przecież nie wiedział

o owych stosunkach częstości drgań. Euler zdaje się przeoczył tę okoliczność, że znaczna większość ludzi, którzy rozkoszują się muzyką i posiadają słuch bardzo czuły na najmniejsze dyssonanse, znajdują się również w położeniu Pytagoresa i nic nie wiedzą o drganiach dźwiękowych i ich stosunkach. Co więcej, nawet ci, którzy doskonale poznali już te stosunki, bynajmniej nie znajdują, aby od tego zwiększyła się rozkosz, jakiej doznają przy słuchaniu utworów muzycznych. Tłómaczenie Eulera jest więc niedostateczne i dopiero wielki przyrodnik—Helmholtz, po głębokiem i wyczerpującem zbadaniu całej kwestyi, zdołał odkryć fizykalną przyczynę konsonansu i dyssonansu, przyczynę tak prostą i zadawalniającą nasze wymagania, że trzeba się tylko dziwić, iż tak długo musiała czekać na swego odkrywcę.

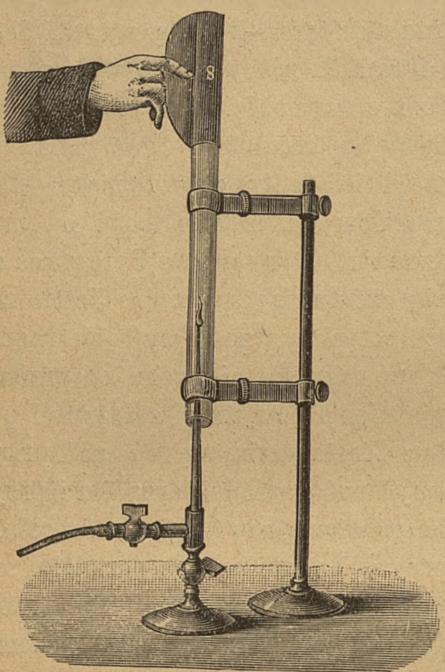


Fig. 242. Uderzenia jako przyczyna dyssonansu.

Następujące doświadczenie, podane przez Tyndalla, najlepiej da nam poznać ową przyczynę. Jeżeli płomień jakiegobądź gazu otoczymy otwartą z obu stron rurą (patrz fig. 156 na str. 230), to wskutek zachodzących w niej drgań powietrza usłyszymy ton, tem wyższy, im krótsza jest rura. Użyjmy do doświadczenia 2 takich śpiewających płomieni i otoczmy jeden z nich rurą o stałej długości, drugi zaś rurą, której długość możemy dowolnie zmieniać, przesuwając w górę lub ku dołowi jedną jej część (na fig. 242 przedstawiona jest tylko ta ostatnia rura). Gdy obie rury są jednakowo długie, wówczas płomienie,

wydając ten sam ton, śpiewają w *unissono;* wydłużmy jednak cokolwiek naszą rurę, przedstawioną na rysunku, a współbrzmienie zostanie naruszone i usłyszymy wyraźne uderzenia, następujące po sobie tak wolno, że z łatwością możemy je liczyć. Przy dalszem przesuwaniu w górę części *s* rury, uderzenia stają się coraz to częstsze, następnie przechodzą w pewien łoskot, różniący się tylko co do szybkości kołysań od szeregu uderzeń odróżnianych jako oddzielne, nareszcie wytwarzają ową nieprzyjemną ochrypłość brzmienia, znaną muzykom pod nazwą dyssonansu. Wysuwając stopniowo wspomnianą część naszej rury, otrzymujemy tedy wszelkie przejścia bez przerwy od oddzielnie słyszalnych uderzeń aż do dyssonansu. Odwróćmy teraz zjawisko, t.j. skracajmy stopniowo naszą wydłużoną rurę, a dyssonans przejdzie w łoskot, następnie w coraz to wolniej po sobie następujące uderzenia, które już w końcu liczyć możemy, aż nareszcie, przy jednakowej długości obu użytych rur, znowu otrzymamy doskonałe współbrzmienie śpiewających płomieni. W ten sposób możemy śledzić uderzenia krok za krokiem, aż przestają one być uderzeniami i przechodzą w dyssonans.

Doświadczenie powyższe ostatecznie dowodzi, że dyssonans powstaje wskutek szybkiego następstwa uderzeń. Przyczyna ta dyssonansu bez wątpienia zostałaby już dawniej odkryta, gdyby umysł ludzki nie był sprowadzony z właściwej drogi przez Youngowską teoryę tonów kombinacyjnych (patrz str. 358). Uczony ten wyobrażał sobie, że uderzenia, jeżeli następują po sobie z pewną szybkością, jednoczą się w ten sam sposób, co i uderzenia powietrza przy zwykłym muzykalnym tonie i zlewają w jeden ciągły ton—kombinacyjny. Faktem atoli jest, że uderzenia wywierają na ucho zupełnie inne wrażenie, niż prawidłowe impulsy zwykłego muzykalnego tonu. Wytwórzmy np. dwa bardzo głośne tony, których różnica częstości drgań wynosi 33, a obok tych tonów usłyszymy jeszcze wyraźnie różnicowy ton kombinacyjny o 33 drganiach na sekundę. Ton ten jest zupełnie równy i muzykalny, podczas gdy 33 uderzeń na sekundę wytwarza, według Helmholtza, nieznośny dla ucha dyssonans; rzeczony ton kombinacyjny nie mógł więc pochodzić od uderzeń.

Gdy liczba uderzeń na sekundę wynosi mniej, niż 33, wówczas nie obrażają one już tak bardzo ucha i mogą nawet, jako naśladowanie tremolowania głosu ludzkiego, stać się przyjemne. Przy większej niż 33 liczbie uderzeń, ochrypłość brzmienia również się zmniejsza, jednak przy 100 jeszcze je odczuwamy; według Helmholtza znikają one zupełnie, gdy liczba ich wynosi 132 na sekundę. Z tego widzimy, że gładkość i równość tonu, wytworzonego przez zwykłe fale dźwiękowe, może być doskonała już przy częstości drgań, leżącej o wiele niżej granicy, przy której uderzenia znikają. W samej rzeczy impulsy zwykłych fal dźwiękowych są bardzo łagodnie odgraniczone, przeciwnie podczas kołysań dźwięku, granice pomiędzy uderzeniami i pauzami są bardzo ostre, wskutek czego doznajemy owych przerywanych wrażeń, które nazywamy dyssonansem, dających się poniekąd porównać do nieprzyjemnego wrażenia, jakie wywiera na oko migotanie się światła.

Liczba uderzeń zależy nietylko od wielkości interwalu pomiędzy dwoma tonami, ale i od absolutnych częstości drgań. Przy tym samym interwalu otrzymamy dla tonów wysokich więcej uderzeń, niż dla średnich, dla tych znowu—więcej, niż dla nizkich. Dlatego też interwale małe (np. sekunda) bardzo wysokich tonów—z powodu zbyt wielkiej liczby uderzeń—bardzo nizkich zaś—z powodu zbyt małej liczby uderzeń—brzmią mniej ochrypło, tworzą mniejszy dyssonans, niż takież interwale tonów średnich. Należy dodać, że tony bardzo nizkie brzmią same przez się ochrypło, raz dlatego, że pojedyńcze drgania słyszymy tu często jako uderzenia, powtóre dlatego, że tony te wytwarzają kołysania z własnemi tonami wyższemi; w ten sposób tłómaczy się owo t. zw. dudnienie bardzo nizkich tonów.

Dotychczas mówiliśmy tylko o uderzeniach, powstających wskutek współbrzmienia dwóch pojedyńczych tonów. Wiemy jednak, że instrumenty muzyczne nie dają wcale brzmień bez tonów wyższych, w które szczególnie obfitują tony instrumentów smyczkowych; oprócz tego powstają jeszcze tony kombinacyjne. Otóż Helmholtz wykazał całą ważność dwóch tych rodzajów tonów dla sprawy konsonansu lub dyssonansu. Kołysania dźwięku

powstają mianowicie nietylko ze współbrzmienia dwóch blizkich siebie tonów zasadniczych, lecz także z wzajemnego na siebie oddziaływania tych ostatnich i tonów górnych, jakoteż kombinacyjnych. Nie możemy tu wyłuszczać rezultatów tych zawiłych oddziaływań, ograniczymy się więc tylko na podaniu ostatecznego wyniku. Dyssonans—według teoryi Helmholtza zgadzającej się z doświadczeniem—polega na ochrypłości współbrzmienia, powstającej przy interwalach o zawiłym stosunku częstości drgań wskutek szybkich uderzeń tonów zasadniczych, górnych i kombinacyjnych. Przeciwnie, konsonans interwalów o prostym stosunku liczb drgań polega na tem, że przy wzajemnem na siebie oddziaływaniu wszystkich trzech rodzajów tonów, nie powstają żadne albo bardzo nieliczne kołysania dźwięku, a więc także żadne albo bardzo nieliczne uderzenia i pauzy.

Ponieważ brzmienie tonów zależy od liczby, wysokości i natężenia tonów górnych, które dla różnych ciał dźwięczących są różne, przeto te same konsonanse i dyssonanse w rozmaitych instrumentach muzycznych muszą brzmieć odmiennie. W instrumentach, dających dźwięki o małej liczbie tonów górnych, dyssonanse brzmią miękko i niewydatnie; dlatego też w nowszej muzyce, nader bogatej w dyssonanse, takie instrumenty nie są używane same: koncert na samych tylko piszczałkach krytych uśpiłby nas wkrótce; „straszniejszym od koncertu na jednym flecie jest koncert na dwóch fletach.“ Z drugiej strony konsonanse instrumentów, bardzo bogatych w tony wyższe, stają się łatwo chropawe i ostre; używa się też ich zwykle tylko przejściowo.

Akkordem nazywamy połączenie trzech lub więcej brzmień, z których każde harmonizuje z pozostałemi. Trójdźwięki *dur* są następujące: prima, wielka tercya i kwinta; wielka tercya, kwinta i oktawa; kwinta, oktawa i decima. Trójdźwięki *moll* powstają z poprzednich przez wstawienie, zamiast wielkiej, małej tercyi. Różnica pomiędzy pierwszemi a drugiemi leży głównie w tonach kombinacyjnych. Bliższy rozbiór tej kwestyi pokazał, że tony kombinacyjne trójdźwięków *dur* wzmacniają pojedyńcze tony akordu; przeciwnie, tony kombinacyjne trójdźwię-

ków *moll*, jako zupełnie obce tonom akordu, udzielają mu coś niejasnego, zamglonego, słowem właściwość akordów *moll*, którą trudno opisać słowami. Dalszych szczegółów harmonii muzycznej, dla braku miejsca, nie możemy tu wyłuszczyć.

§ 2. Instrumenty muzyczne. Narząd głosowy człowieka.

Wszystkie instrumenty muzyczne dają się podzielić na 2 grupy. Do pierwszej należą takie, w których ton zostaje wytworzony przez drgania ciała stałego, do drugiej zaś takie, w których ton powstaje wskutek drgania słupa powietrza.

Z ciał stałych największe zastosowanie w muzyce znajdują napięte struny; ponieważ jednak powierzchnia strun jest zbyt mała, aby mogły one nawet przy najsilniejszych drganiach wytwarzać w otaczającem powietrzu fale o znacznych amplitudach, koniecznie więc należy drgania strun przenosić na elastyczne ciała stałe o dużej powierzchni, na deki pudeł rezonansowych, w które zaopatrzone są wszystkie instrumenty strunowe (patrz str. 288). Najważniejsza różnica pomiędzy temi ostatniemi polega na sposobie wprawiania strun w oscylacye. W fortepianach dokonywają tego młotki, pokryte miękką skórą, uderzające o bardzo silnie naciągnięte, mocne struny metalowe; młotki te zostają wprawione w ruch przez naciskanie odpowiednich klawiszów. Dźwięk struny fortepianowej, pobudzonej w zwykły sposób, jest bardzo bogaty w tony harmoniczne, z których siódmy, jako niezgodny z tonem zasadniczym, bywa umyślnie usuwany przez wybór odpowiedniego miejsca na strunie, w które uderza młotek; ósmy i następne tony harmoniczne są bardzo słabo reprezentowane. Obszar skali fortepianowej rozciąga się od $A_{,,}$ do a'''' lub nawet do c'''''; różne tony wydawane są przez struny różnej długości: nizkie—przez struny długie, wysokie—przez coraz to krótsze struny. W harfie, gitarze, cytrze, teorbanie, lirze i innych podobnych instrumentach, które szczególniej rozpowszechnione były śród starożytnych, struny wprawia się w drgania przez zarywanie palcami. W skrzypcach, altówce, wiolonczeli i kontrabasie dokonywa się tego przez pociąganie smyczkiem, od

tego instrumenty te nazywają się smyczkowemi. Wszystkie instrumenty smyczkowe mają po 4 struny, nastrojone w skrzypcach na *g*, *d'*, *a'*, *e''*, w altówce—na *c*, *g*, *d' a'*, w wiolonczeli—na *C*, *G*, *d*, *a*, w kontrabasie—na *C'*, *A'*, *D*, *G*. Inne tony grający wydobywa, skracając długość brzmiących strun przez naciskanie ich w odpowiednich punktach palcami lewej ręki i pociągając smyczkiem oddzieloną w ten sposób część struny. Drgania strun zostają wzmocnione przez drgania pudła rezonansowego i zawartego w niem powietrza; o ważnym wpływie tego ostatniego można się przekonać, zakrywając papierem otwory w dece pudła: dźwięk instrumentu bardzo się wtedy zmienia na niekorzyść. Dźwięki instrumentów smyczkowych są nader bogate w tony harmoniczne, zwłaszcza wyższe i w muzyce orkiestrowej instrumenty te odgrywają najważniejszą rolę. Drgające krążki, płyty i błony mają wprawdzie dostatecznie wielką powierzchnię, aby wytwarzać w powietrzu wyraźne fale dźwiękowe, same jedne nie są atoli używane, w połączeniu natomiast z innemi instrumentami oddają muzyce orkiestrowej znakomite usługi. Dzwonów używa się głównie wtedy, gdy chodzi o to, aby dźwięk był słyszany daleko wokoło.

Przejdźmy teraz do drugiej grupy instrumentów, zwanych dętemi. Rury ich, w których zawarte jest drgające powietrze, oznaczamy wspólnem mianem piszczałek albo fujarek. Odróżniają, jak nam już wiadomo, dwa ich rodzaje: wargowe i języczkowe.

W organach, zawierających zarówno piszczałki wargowe—kryte i otwarte, jak i języczkowe, każdej z nich odpowiada jeden ton zasadniczy. Szerokie piszczałki kryte dają, zwłaszcza przy słabem zadęciu, prawie tylko ton zasadniczy, wskutek czego brzmienie ich jest nieco czcze; dla usunięcia tego braku łączą z niemi krótsze piszczałki, przez co otrzymuje się odnośne tony harmoniczne. Wązkie piszczałki kryte wytwarzają obok tonu zasadniczego, pierwszy przyton—mianowicie kwintę oktawy. W brzmieniu szerokich piszczałek otwartych, oprócz tonu zasadniczego, słychać dosyć wyraźnie pierwszy przyton t. j. oktawę, drugi zaś—kwinta oktawy—występuje już znacznie słabiej. Wąz-

kie otwarte fujarki dają, zwłaszcza przy silniejszem zadęciu, cały szereg przytonów, głośno towarzyszących tonowi zasadniczemu, co nadaje całemu brzmieniu ostry nieco charakter, przypominający poniekąd brzmienie skrzypiec. Wyższe regestry organów, jak regestr fletowy, składają się prawie wyłącznie z piszczałek krytych, dających milsze i łagodniejsze tony, niż otwarte. Języczki dodaje się do niektórych piszczałek dla obniżenia ich tonów.

Flet, pikulina i flageolet przedstawiają piszczałki wargowe otwarte. W instrumentach tych, dających słabe tylko i bardzo nieliczne przytony, jedna i ta sama rura służy do wytwarzania wszystkich tonów gamy chromatycznej; dokonywa się zaś tego przez zamykanie lub otwieranie otworów bocznych, wskutek czego zmienia się długość drgającego słupa powietrza (oraz położenie węzłów), a więc i wysokość odnośnego tonu. W flageolecie mundsztuk jest tak urządzony, że powietrze wchodzi do jego wnętrza tylko w kierunku, przy którym powstaje najprzyjemniejszy ton. We flecie zaś i pikulinie kierunek prądu, wzbudzającego drgania, a do pewnego stopnia także rodzaj dźwięku i nawet wysokość tonu znajdują się pod kontrolą grającego.

Z instrumentów dętych języczkowych, harmonika ustna i fisharmonia nie posiadają wcale czar głosowych, lecz tylko pudła rezonansowe, które działają jako pośredniki i większą swą powierzchnią przenoszą słabe drgania języczków na otaczające pudło powietrze. Języczkowe piszczałki organów zaopatrzone są w czary głosowe (patrz fig. 216, str. 320), wzmacniające ton zasadniczy, jakoteż przytony języczka, który w tych instrumentach jest sztywny, tak że długość czary musi być przystosowana do jego rozmiarów (patrz str. 320). Brzmienia języczkowe są ostre i grzechotliwe, stosowne jednak czary głosowe mogą znacznie złagodzić ostrość brzmienia.

Zupełnie inaczej zachowują się instrumenty dęte o języczku lekkim i giętkim, wyrabianym po większej części z trzciny włoskiej; języczek taki przystosowuje się do drgań słupa powietrza, zawartego w połączonej z nim fujarce (patrz str. 322); ta sama piszczałka służy do wytwarzania różnych tonów, podobnie jak to się dzieje we flecie. Tu należą: klarnet, obój, fagot, zwykła

fujarka wierzbowa i inne podobne instrumenty. Klarnet, z powodu jednostajnej szerokości fujarki, zachowuje się jak piszczałka kryta; daje on tony, o oktawę wyższe od tonów fletu równej długości, z przytonów zaś daje tylko nieparzyste; przeciwnie obój i fagot, z powodu ostrokręgowego rozszerzenia fujarek, zbliżają się więcej do piszczałek otwartych. Mundsztuk klarnetu posiada pojedyńczy języczek trzcinowy, który przy zadęciu prawie zupełnie zamyka otwór ustny; obój zaś i fagot mają podwójny języczek, podobnie jak i fujarka wierzbowa, która może być uważana za pierwowzór tych ostatnich instrumentów.

Blaszane (mosiężne) instrumenty dęte, jak: różne trąby, róg, bombardon, ofikleida, cornet à piston i t. d. są to również piszczałki języczkowe otwarte, chociaż nie mają wcale języczków. Te ostatnie zastąpione są tu przez wargi grającego, które podczas grania silnie się przyciska do mundsztuka, tak jednak, ażeby pomiędzy niemi pozostała jeszcze wązka szpara dla przepuszczenia powietrza, wdymanego przez płuca. Brzegi warg przy zadęciu zostają wprawione w drgania, powietrze zaś, zawarte w instrumencie, odbrzmiewa; w podobny sposób tłómaczy się także zwykłe świstanie wargami, językiem i zębami. Mniej lub więcej zgięta albo skręcona rura tych instrumentów jest bardzo wązka w stosunku do jej długości tak, że nie daje ona nigdy tonu zasadniczego, lecz tylko tony harmoniczne, zależnie od sposobu i siły zadęcia oraz napięcia warg. Ponieważ jednak długość rury, a zatem i objętość drgającego powietrza można zmieniać, przeto każdy ton w obrębie pewnej skali można uczynić tonem harmonicznym pewnego tonu zasadniczego. Zmiany te grający uskutecznia za pomocą wysuwania rury (jak np. w trombonach), albo za pomocą tłoków, które wydłużają rurę o pewną z góry określoną wielkość (np. w trąbce lub w cornet à piston), albo wreszcie za pomocą drążków, które skracają rurę (np. w ofikleidzie). Niektóre jednak instrumenty, jak róg francuzki, dają tylko pewien ton zasadniczy oraz jego przytony; objętość drgającego w nich powietrza można atoli zmieniać przez używanie t. zw. nadstawek, których wymiary są tak dobrane, aby zmieniały ton zasadniczy o pewien z góry określony interwal, zależny

od wielkości nadstawki. Oprócz tego wydawany ton można jeszcze zmieniać w pewnych granicach, zarówno co do wysokości, jak i brzmienia, przez stosowne ułożenie warg, jakoteż przez zasłanianie prawą ręką wylotu instrumentu lub przez granie przy otwartym wylocie. Instrumenty te dają tony tej samej wysokości, co i piszczałki otwarte równej długości. Dźwięki ich są nader bogate w tony harmoniczne, zwłaszcza wyższe.

Organ głosowy człowieka i wielu zwierząt przedstawia również pewnego rodzaju piszczałkę języczkową: płuca tworzą miech; tchawica — przewód powietrzny; krtań — nóżkę, której górna część, zamiast języczka, zawiera wiązadła elastyczne; gardziel i jama ustna — czarę głosową.

Tchawica stanowi, jak wiadomo, długą rurę, przez którą wdychane powietrze dostaje się do płuc; składa się ona z pewnej liczby chrząstkowatych obrączek, umieszczonych jedna nad drugą. Górną część tchawicy tworzy *krtań* — najważniejsza część organu głosowego, składająca się z chrząstek: pierścieniowej, tarczowej i dwóch czerpakowych, oraz kilku innych mniejszych; są one połączone z sobą i z górną obrączką tchawicy i mogą się zbliżać lub oddalać od siebie pod wpływem działania pewnych mięśni. Wpoprzek krtani ciągną się dwa elastyczne paski, zwane *wiązadłami* albo *strunami głosowemi*, przyczepione od przodu do chrząstki tarczowej, od tyłu zaś do chrząstek czerpakowych tak jednak, że pomiędzy temi wiązadłami pozostaje jeszcze szpara, przepuszczająca powietrze — *szpara głosowa* czyli *głośnia* (glottis) ([1]). Ponad temi wiązadłami znajdują się dwie boczne workowate jamistości (ventriculi Morgagni), których górne brzegi, zbliżone do siebie, tworzą jakby drugą szparę głosową, nakrywaną przez t. zw. *nagłośnię* (epiglottis) ([2]) — chrząstkę, leżącą tuż za językiem i przyczepioną jednym końcem do przedniej części gardzieli. Przy oddychaniu lub wydawaniu głosu nagłośnia się podnosi, przeciwnie przy połykaniu opuszcza się i nakrywa górną szparę, powstrzymując pokarm lub napój od wejścia do

---

([1]) Przez wyraz *glottis* grecy oznaczali górną część fletu.

([2]) *Epi* znaczy po grecku *na, nad*.

Roznosiciele mają Prospekty i Zeszyty na okaz!

Дозволено Цензурою, Варшава 21 Апрѣля 1889 г.

Druk Jana Cotty w Warszawie, Senatorska 29.